

Н.И.Самойленко, Е.Е.Дашевская

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА

по реновации
водораспределительной
сети



Харьков - 2008

**Министерство образования и науки Украины
Харьковская национальная академия городского
хозяйства**

Н.И.Самойленко, Е.Е.Дашевская

**ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА
ПО РЕНОВАЦИИ
ВОДОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ**

Под редакцией Самойленко Н.И.

Харьков

2008

УДК 004.891:628.143

**ББК 38.761.1
78**

Рекомендовано Ученым советом Харьковской национальной академии городского хозяйства в качестве монографии, протокол № 9 от 25 апреля 2008 г.

С17 Самойленко М.И., Дашевська О.Є.

С17 Экспертна система з реновації водорозподільної мережі: Монографія / Самойленко М.И., Дашевська О.Є.; під ред. М.И. Самойленка: ХНАМГ. – Горлівка: ПП. «Видавництво Ліхтар», 2008. – 140 с.: іл., табл. – Бібліогр.: с. 136-139.

ISBN 978-966-2129-24-3

Розглядаються питання організації і проведення першочергових робіт з реновації зношених ділянок трубопровідної розподільної мережі. Доводяться математичні моделі і методи виявлення аварійно небезпечних ділянок, які засновані на принципах штучного інтелекту. Пропонується експертна система для підтримки прийняття рішень з проведення робіт реновації мережі. Проводиться економічне обґрунтування ефективності використання експертної системи в умовах тривалої експлуатації розподільної мережі.

Для наукових та інженерно-технічних працівників науково-дослідних, проектних і виробничих організацій, зв'язаних з експлуатацією і розвитком трубопровідних розподільних мереж.

Табл. – 7. Іл. – 33. Бібліогр. – 59 назв.

Самойленко Н.И., Дашевская Е.Е.

**ББК 38.761.1
78**

С17 Экспертная система по реновации водораспределительной сети: Монография / Самойленко Н.И., Дашевская Е.Е.; под ред. Н.И.Самойленко: ХНАГХ. – Горловка: ЧП «Видавництво Ліхтар», 2008. – 140 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 136-139.

Рассматриваются вопросы организации и проведения первоочередных работ по реновации изношенных участков трубопроводной распределительной сети. Приводятся математические модели и методы выявления аварийно опасных участков, основанные на принципах искусственного интеллекта. Предлагается экспертная система для поддержки принятия решений по проведению работ реновации сети. Проводится экономическое обоснование эффективности использования экспертной системы в условиях длительной эксплуатации распределительной сети.

Для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских, проектных и производственных организаций, связанных с эксплуатацией и развитием трубопроводных распределительных сетей.

Табл. – 7. Ил. – 33. Библиогр. – 59 назв.

Рецензенты:

В.М.Левыкин – д-р техн. наук, проф. Харьковского национального университета радиоэлектроники;

М.Д.Гинзбург – д-р техн. наук, проф. Научно-исследовательского проектного института АСУтрансгаз.

ISBN 978-966-2129-24-3

© Харьковская национальная академия городского хозяйства,
Самойленко Н.И.,
Дашевская Е.Е., 2008

Содержание

Предисловие.	6
Раздел 1	
СИСТЕМА ВОДОСНАБЖЕНИЯ КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ	8
1.1. Развитие информационных технологий в контексте управления	8
1.2. Анализ особенностей управления предприятием водоснабжения	11
1.3. Характеристика объекта исследования	18
1.4. Цели исследования	23
1.5. Выбор математического аппарата	25
1.6. Задачи исследования	38
Раздел 2	
МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РАБОТАМИ РЕНОВАЦИИ.	40
2.1. Исследование основных подходов в задачах оценки состояния участка трубопровода и управления работами реновации на ВРС	40
2.2. Сравнительный анализ свойств моделей прогноза безаварийного состояния участка водораспределительной сети	46
2.2.1. Содержательная постановка задачи прогноза безаварийного состояния участка ВРС	47
2.2.2. Прогнозирование методом множественной линейной регрессии	48

Содержание

2.2.3.	Прогнозирование на основе метода нелинейной множественной регрессии	52
2.2.4.	Прогнозирование на основе искусственных нейронных сетей	56
2.2.5.	Модели Колмогорова-Габбора	63
2.3.	Разработка моделей самоорганизации для поддержки принятия решений по оценке состояния участка трубопровода и выбора способа реновации.	66
2.3.1.	Разработка прогнозирующей модели объекта управления	66
2.3.2.	Разработка модели выбора способа проведения работ по реновации участка водораспределительной сети	68
2.4.	Составление и анализ расписания проведения работ по реновации ВРС	72

Раздел 3

МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ РАБОТАМИ РЕНОВАЦИИ.		80
3.1.	Анализ особенностей автоматизированного принятия решений по управлению работами реновации . . .	80
3.2.	Разработка структуры метода принятия решений по управлению работами реновации с использованием моделей самоорганизации	86
3.3.	Разработка алгоритма поддержки принятия решений по управлению работами реновации в режиме эксплуатации с адаптацией моделей самоорганизации . .	93
3.4.	Разработка алгоритма поддержки принятия решений в режиме эксплуатации с фиксированными моделями самоорганизации	98
3.5.	Разработка алгоритма составления и анализа расписания работ реновации на ВРС	102
3.6.	Разработка метода поддержки принятия решений в задачах управления работами реновации	104

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЗДАНИЯ, ВНЕДРЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ПО РЕНОВАЦИИ ВОДОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ . . .	110
4.1. Экспертная система как инструмент для обработки данных .	110
4.2. Структура и функции экспертной системы	115
4.3 Оценка количественных показателей эффективности внедрения и эксплуатации экспертной системы . .	121
4.4. Расчет экономического эффекта за счет снижения непроизводительных расходов воды	125
4.5. Оценка качественных показателей эффективности разработанной экспертной системы	130
Послесловие	132
Словарь терминов	134
Список использованной литературы	136

Предисловие

В последнее время наблюдается рост количества техногенных катастроф, представляющих угрозу жизнедеятельности людей и наносящих ущерб экономике страны. Для устранения последствий катастроф требуется привлечение значительных материальных и трудовых ресурсов. Во избежание или для предупреждения катастроф необходимо постоянно отслеживать (идентифицировать и поддерживать на надлежащем уровне) текущее состояние всех инженерных сооружений, в частности инженерных сетей, входящих в состав систем жизнеобеспечения населения. Особую актуальность проблема оценки состояния приобретает при эксплуатации водораспределительной сети (ВРС) в условиях длительной эксплуатации и высокой изношенности, где она влияет как на риск возникновения экологической катастрофы, так и на стабильность, надёжность и эффективность работы системы водоснабжения в целом.

В последние годы усложняются условия эксплуатации ВРС вследствие увеличения количества повреждений, необходимости проведения аварийно-восстановительных работ с раскрытием асфальтобетонного покрытия, роста технической изношенности отдельных участков и всей сети в целом, увеличения насыщенности инфраструктуры города и других причин. Такая эксплуатация ВРС требует дополнительных финансовых, материальных и трудовых затрат от предприятий водоснабжения, а потребители сети испытывают дополнительные бытовые неудобства.

Существующая система финансирования предприятий водоснабжения для проведения работ реновации ВРС не предусматривает больших капиталовложений. Поэтому вполне оправданы

усилия исследователей, направленные на привлечение скрытых резервов, не требующих значительных затрат и способных продлить срок службы ВРС в целом или отдельных её участков. Одним из таких резервов является создание экспертной системы (ЭС), которая позволит обеспечить принятие обоснованных решений по:

- планированию выбора первоочередных участков трубопровода для проведения работ реновации;
- выбору способа реновации выбранного участка;
- составлению расписания работ реновации в условиях ограниченности ресурсов.

Создание ЭС по реновации водораспределительной сети особенно актуально в условиях постоянного роста объёма анализируемой информации, усложнения сбора распределенных данных, комплексного учета всех существенных параметров и эволюционных изменений отдельных участков и сети в целом.

Разработка ЭС, в свою очередь, требует разработку принципиально новых методов обработки и анализа накопленной информации для принятия объективных решений по дальнейшей эксплуатации ВРС, и в частности для мониторинга работ по восстановлению и обновлению физически устаревших участков сети.

Настоящая монография освещает все этапы разработки математических моделей и методов, положенных в основу создания экспертной системы по оценке состояния участков трубопровода и по мониторингу работ реновации на водораспределительной сети.

Результаты исследований, проведенных по тематике монографии, формируют новую информационную технологию по управлению работами реновации на водораспределительной сети.

РАЗДЕЛ 1

СИСТЕМА ВОДОСНАБЖЕНИЯ КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Развитие информационных технологий в контексте управления

Компьютеризация и информатизация во всех сферах человеческой деятельности являются мощным рычагом повышения эффективности. Относительно небольшие затраты на внедрение новых информационных технологий быстро окупаются, а сами технологии становятся незаменимыми и на производстве, и в быту.

Под информационной технологией (ИТ) понимают совокупность технологических устройств, программного обеспечения, методов и процессов, используемых для обработки информации [1].

Историю развития информационных технологий можно разделить на несколько этапов. Каждый этап, на фоне кардинальных изменений в области обработки информации, характеризуется переходом общественных и производственных принципов управления на качественно новый уровень. Основные функции управления состоят в организации, планировании, контроле, анализе и генерировании управляющего воздействия, которые осуществляются в различных областях деятельности человека. До второй половины XIX века преобладала «ручная» информационная технология.

В 40-60-е годы XX века распространяется «электрическая» технология, которая использует большие ЭВМ, электрические пишущие машинки, копировальные аппараты, портативные диктофоны. На этом этапе повышается качество, количество и скорость обработки информации.

Необходимость выделения отдельных задач управления на уровне технологического подразделения предприятия дает толчок развитию и широкого применения систем автоматизированного проектирования (САПР). САПР предназначены для выполнения класса задач, требующих непосредственного участия человека для принятия оперативных решений, ограниченные видом деятельности и небольшим периодом работы предприятия. Наибольшее применение САПР получили в решении проектно-конструкторских задач, для которых выработка решений имеет строгую последовательность действий, с постоянным алгоритмом расчета, не учитывающим изменений условий и поиска компромиссных решений. К основным функциям САПР относят задачи учета, сбора, предварительной подготовки данных, их обработки и формирования проектных решений [2].

В начале 70-х годов сложилась новая информационная технология - "электронная". С появлением больших вычислительных центров создаются автоматизированные системы управления (АСУ), со специализированными программными комплексами, цель которых повысить качество решения задач контроля и управления. Здесь следует отметить, что впервые на территории Советского Союза интегрированная автоматизированная система управления водоснабжением внедрена в городе Харькове.

АСУ водоснабжением имела трехуровневую иерархическую структуру управления. На нижнем уровне решались задачи, связанные с оперативным управлением отдельных сооружений. На среднем – задачи оперативного управления совместной работы сооружений и водопроводных сетей города. На верхнем

уровне – задачи организационно-экономического управления, связанные с административно-хозяйственной деятельностью всего предприятия.

Таким образом, основными функциями АСУ являются сбор, обработка и представление справочной, статистической и контролирующей информации текущего состояния объекта и процесса управления, а также выработка и реализация управленческих воздействий [3,4].

Современная концепция развития информации сформулирована известным философом И. Пригожиным: «... мир уже не может рассматриваться как своеобразный музей, в котором каждый бит информации сохраняется; мир – это процессы, разрушающие и генерирующие информацию и структуру» [5].

С середины 80-х годов с развитием интегральных схем, микропроцессорной техники и широким распространением персональных компьютеров (ПК) начинается "компьютерная" технология. На этом этапе происходит принципиальная модернизация идеи АСУ: от громоздких вычислительных центров и централизации управления к распределенной обработке информации и децентрализации управления, использованию стандартных программных продуктов разного назначения.

До сих пор, с точки зрения автоматизации, рассматривались объекты или процессы непрерывные по своей природе. И в практической реализации использовались логико-алгебраические и вероятностные методы моделирования [6,7,8]. В этом случае разрабатываемый класс моделей для задач принятия управленческих решений ограничивался возможностью математического описания физической природы объекта или процесса в форме уравнений, функций и алгоритмов.

С накоплением большого количества баз данных, содержащих различную технологическую информацию, увеличением ско-

рости обработки данных с разной структурой, развитием новых методов моделирования и организации программного обеспечения стало экономически и технически возможным моделирование процессов поддержки принятия решений в управлении сложными системами. К числу таких систем можно отнести систему водоснабжения, а к рассматриваемым процессам – оптимизацию управления организационными структурами предприятия и определение стратегии развития сложных технологических систем.

1.2. Анализ особенностей управления предприятием водоснабжения

Особенность управления предприятием водоснабжения состоит в реализации функций производства, транспортирования, распределения и контроля качества воды [9]. Требование эффективного управления любым технологическим процессом предприятия состоит в необходимости оперативной, точной и объективной оценки ситуации и принятия управленческого решения. Особенно остро решение этих задач стоит при экстремальных ситуациях, угрожающих целостности функционирования систем водоснабжения, влияющих на ресурсо- и энергопотребление, экологическое состояние окружающей среды.

Структурная схема системы водоснабжения как объекта управления представлена на рис. 1.1.

Основные научные результаты настоящей монографии относятся к подсистеме контроля и мониторинга состояния водораспределительной сети, выделенной на схеме серым фоном. Рассматриваемая подсистема является одной из составных частей подсистемы подачи и распределения воды.

Рассмотрим функциональную схему взаимодействия подсистемы контроля и мониторинга состояния ВРС с другими подсистемами (рис. 1.2).

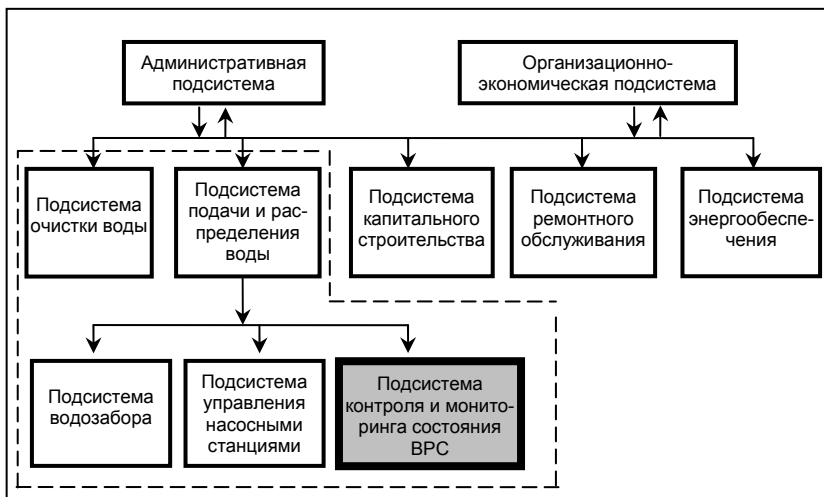


Рис. 1.1 – Структурная схема системы водоснабжения

Водораспределительная сеть получает возмущающие воздействия от 1-го, 2-го и 3-го уровня управления. В свою очередь подсистемы трех уровней зависят и изменяются под влиянием состояния ВРС, особенно аварийных.

Для описания состояния ВРС с целью принятия эффективно-го решения по управлению в штатных и аварийных ситуациях уточняются технические и статистические параметры участков трубопровода и подсистем уровней управления.

Подсистема 1-го уровня является основной и обеспечивает ВРС экологически чистым целевым продуктом в требуемом количестве и в необходимом диапазоне давления.

Подсистема 2-го уровня относится к вспомогательной и изменяет структуру ВРС за счет работ реновации, профилактических, текущих ремонтов существующих участков и строительству новых.

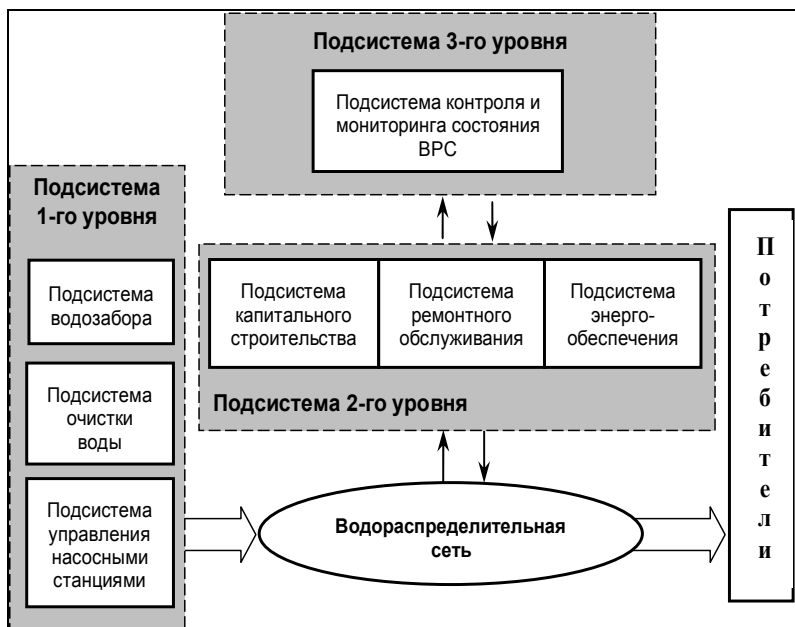


Рис. 1.2 – Функциональная схема взаимодействия подсистемы управления ВРС

Задача управляющей подсистемы 3-го уровня, состоит в выполнении процедуры поддержки принятия решений по обеспечению функциональной целостности ВРС и осуществлению снабжения потребителей чистой и безопасной для потребителя воды.

Таким образом, подсистема 2-го уровня изменяет структуру водораспределительной сети путем внешнего воздействия, а подсистема 3-го уровня посредством обоснованного принятия решения на основе оценки состояния участков трубопровода, планирования и организации работ реновации.

Связь между подсистемами первого уровня управления с потребителем осуществляется посредством водораспределительной сети. Поэтому уровень технического состояния участков трубопровода является одним из условий выполнения основного своего функционального назначения, которое состоит в доставке потребителю качественной и в требуемом количестве воды.

Вопрос целостности и санитарного состояния трубопроводной сети, соблюдение требований и норм эксплуатации занимает особое значение в задаче эффективной работы систем водоснабжения. «Для существующих сетей и водоводов при необходимости следует предусматривать мероприятия по восстановлению и сохранению пропускной способности путем очистки внутренней поверхности стальных труб и нанесения антикоррозийного защитного покрытия» [10]. Для этого необходимо вести постоянный контроль состояний участков водораспределительной сети с целью выявления аварийных участков для выполнения работ реновации.

Такой контроль предполагает анализ и оценку меняющихся характеристик процессов, происходящих в водораспределительной сети. При этом необходимо учитывать многофакторный характер технологической информации, её многокритериальность, что требует использования новых методов моделирования процесса управления работами реновации ВРС.

Эффективное автоматизированное управление процессами, происходящими в водораспределительной сети, предполагает использование адекватных математических моделей. Поскольку ВРС является эволюционирующей системой, то и математические модели процессов в системе также должны быть подвержены эволюции. Если на первых стадиях эволюции система не имеет изношенных участков и её структура отвечает проектной документации, то в процессе длительной эксплуатации все компоненты системы претерпевают различные эволюционные изменения, многие из которых непредсказуемы. Безусловно, первоначальные

модели процессов не могут учитывать непрогнозируемые изменения. Только накопленные статистические сведения позволяют скорректировать исходные модели и сделать их адекватными реальным процессам. При этом достигнутое на определённый момент времени соответствие между моделями и процессами сохраняется непродолжительное время.

Таким образом, новые методы моделирования процессов управления ВРС должны быть направлены на создание эволюционирующих моделей, которые меняют свой вид (структуру, значения параметров) синхронно с эволюцией объекта моделирования.

Новые методы эволюционного моделирования должны обеспечить руководство и инженерно-технические службы по эксплуатации и развитию систем водоснабжения новой методикой для идентификации:

физических процессов в ВРС как необходимого условия автоматизированного управления;

процессов управления для определения необходимых средств и методов воздействия на эволюционирующий объект;

процессов прогнозирования состояния ВРС для эффективной эксплуатации за счет учета поведения объекта в будущем.

Ввиду того, что ВРС относится к классу непрерывно эволюционирующих систем, моделирование процессов управления такими системами имеет свои сложности, связанные со специфическими свойствами информационного обеспечения разрабатываемых моделей. Для информации, описывающей ВРС, характерны: нестационарность; многомерность внешних факторов и измеряемых параметров; трудоемкость измерений натурных данных; неполнота данных, приводящая к неправильной трактовке и интерпретации получаемых результатов [11,12,13].

На основе вышесказанного можно сделать вывод, что сложность физической природы исследуемых процессов обуславливает неоднозначность математического описания. Следовательно, применяемый метод должен иметь компромисс между детальной формализацией и полной адекватности описания, а также необходимостью эффективной реализации алгоритма на основе имеющихся исходных данных.

Задачи автоматизированного управления водораспределительными сетями широко описаны в работах [7,8,11,14] и охватывают справочную, статистическую и следящую функции управления. При этом в основу построения программных средств автоматизации системы управления положена концепция, согласно которой выбор структуры базы данных, метода решения, разработки алгоритма решения задачи и форма представления данных для анализа и поддержки принятия решения запрограммированы заранее в виде строгих математических моделей. Основным недостатком использования такой реализации управления, является ограниченная возможность практического применения: при увеличении числа анализируемых задач растет количество моделей, которые необходимо создавать для их решения, и, как следствие, процесс принятия решения требует значительных временных, трудовых и материальных затрат и происходит в отрыве от реальной ситуации. Увеличивающиеся объемы анализируемых данных, комплексный учет всех факторов, влияющих на качество принятия решения, требуют разработки таких математических моделей и методов обработки информации, которые обладают возможностью гибкой постановки задач, имеют большую информационную емкость и не нуждаются в длительной разработке. Методологической основой решения такого класса задач является построение экспертных систем.

Экспертная система представляет собой компьютерную программу, которая позволяет, используя знания эксперта, получать достоверные и эффективные решения в конкретной предметной

области [15]. Обладая теоретическими знаниями и опытом эксплуатации, человек-эксперт на основе системы выработки знаний по выбранному методу обработки информации поддерживает процедуру принятия решений.

Актуальность и необходимость использования ЭС в системе поддержки принятия решений по оценке состояния участков ВРС, планированию и организации работ по реновации объясняется специфичностью и повышенной технологической сложностью управления, высокой ценой ошибочных действий. Для выработки оперативных и долгосрочных управленческих решений необходимы постоянно действующие системы обработки исходных данных с последующей выдачей управленческих решений. Поэтому при построении таких систем наряду с традиционными методами и моделями математического программирования, статистического анализа и теории принятия решения необходимо использовать методы искусственного интеллекта (ИИ), обеспечивающие адаптивность и обучение самой системы. Методы ИИ позволяют в условиях неполноты исходной информации, используя вероятно-статистические методы, вырабатывать суждения и объяснения, выдаваемые в качестве советов [16].

Из сказанного следует, что методы решения задач управления формируются на основе информационных технологий и меняются вместе с развитием технических и программных средств их реализации. Дальнейшее развитие информационных технологий требует организационных и технических изменений в системе поддержки принятия решений. «Недоучет взаимосвязи технологических и организационных структур влечет за собой существенные нарушения в производственной деятельности» [17]. Без заинтересованности руководителей разных уровней управления невозможно повысить качество и эффективность принятия решений.

1.3. Характеристика объекта исследования

В комплексе задач повышения эффективности процедуры поддержки принятия решений по оценки состояния и мониторинга водораспределительной сети необходимо решать вопросы, связанные с контролем состояния участков трубопровода и разработки стратегии проведения работ реновации. Это позволит составлять оперативные и долгосрочные планы с целью снижения расходов электроэнергии, уменьшения вероятности возникновения новых аварий, сокращения количества непроизводительных потерь воды, повышения качества транспортируемой воды.

Сегодня состояние ВРС по данным предприятия водоснабжения города Харькова характеризуется увеличением количества повреждений (рис.1.3), ростом технического износа трубопроводов (рис.1.4). И как следствие – увеличение ресурсо- и энергопотребления за счет роста явных и скрытых разрывов труб, ухудшение экологической безопасности питьевого водопользования. В сложившихся условиях необходимо внедрять комплекс мероприятий по совершенствованию работы водораспределительной сети.

Предприятия водоснабжения внедряют и реализуют комплекс мероприятий по обеспечению оптимальных режимов работы ВРС [18,19,20,21,22]. Так, например, в коммунальном предприятии «Производственно-технологическое предприятие «Вода» (КП "ПТП "Вода") г. Харькова осуществляют следующие мероприятия, направленные на снижение аварийности участков ВРС и обеспечение бесперебойного водоснабжения потребителей:

устройство контрольных точек на ВРС, с целью уменьшения избыточных напоров;

оптимизация зон водоснабжения за счет устройства перемычек между гравитационными водоводами и напорными ВРС;

замена и восстановление запорной арматуры;



Рис. 1.3 – Динамика роста количества повреждений на 1 км ВРС г. Харькова по годам

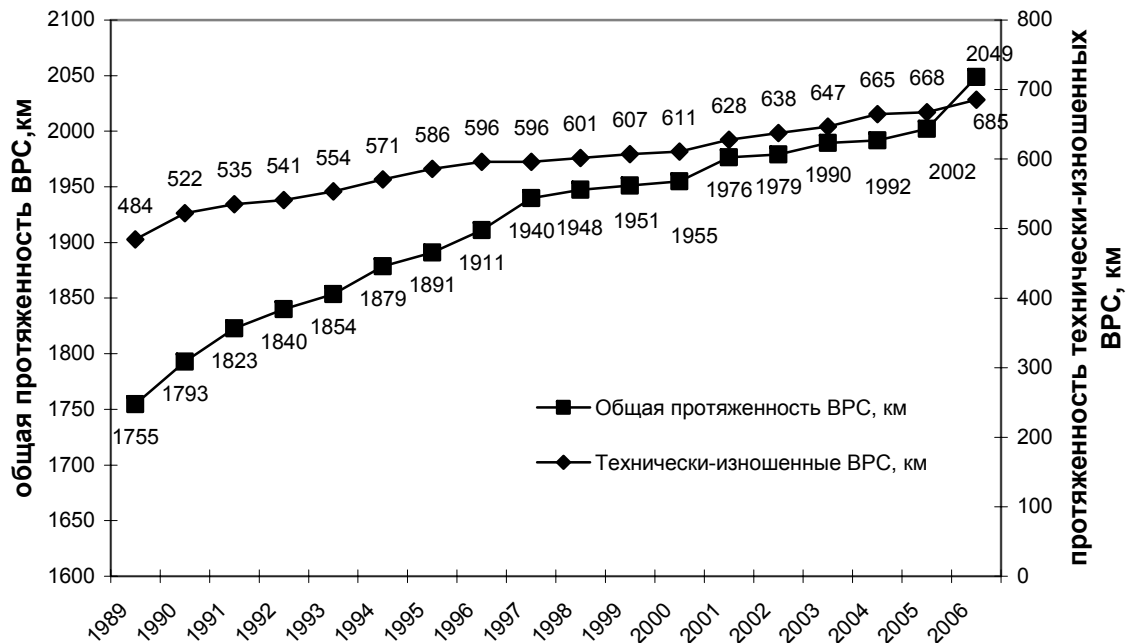


Рис. 1.4 – Динамика роста общей протяженности и технически-изношенных участков ВРС г. Харькова

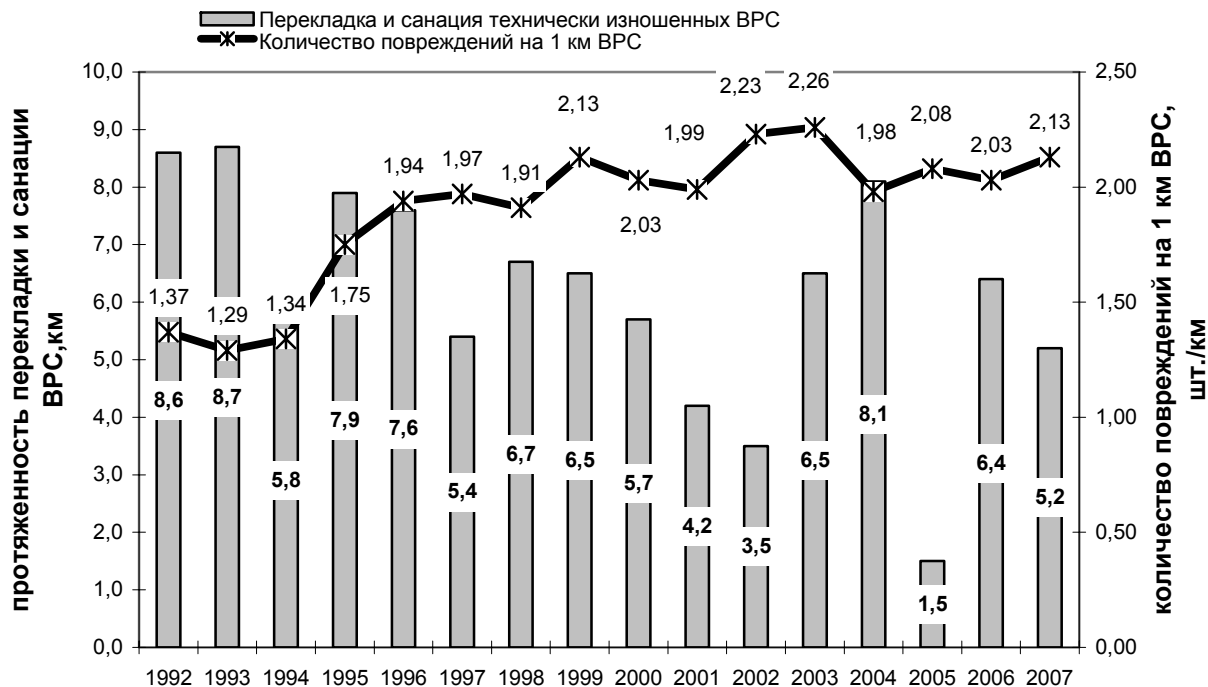


Рис. 1.5 – Характеристика состояния водораспределительной сети г. Харькова за последние 15 лет

изменение стратегии планирования работ реновации, увеличение объемов санации и перекладки первоочередных участков трубопроводной сети.

В последние годы, по статистическим данным предприятия КП "ПТП "Вода", на фоне увеличения количества повреждений на водораспределительной сети уменьшаются темпы проведения работ по реновации (рис. 1.5). Для сравнения, средний уровень интенсивности отказов в городах Евросоюза составляет 0,2 повреждения в год на 1 км ВРС, что в два раза меньше соответствующего показателя в городах Украины.

Сложившаяся ситуация обусловлена, прежде всего, недостаточным финансированием проектов по реновации трубопроводной сети. Как уже отмечалось, установившаяся система финансирования не предусматривает крупных капиталовложений. Поэтому предприятиям водоснабжения необходимо искать и использовать новые средства для исправления ситуации. Одним из вариантов повышения эффективности управления ВРС является своевременное выявление участков трубопроводной сети для проведения работ реновации, ранжирование их по прогнозу выхода из строя и определение способа восстановления участка трубопровода, используя ретроспективные статистические данные о повреждениях на ВРС и новые информационные технологии.

Таким образом, исследование в направлении дальнейшей реализации и внедрения информационных технологий для моделирования процедуры поддержки принятия решений в подсистеме контроля и мониторинга состояния водораспределительной сети является актуальным и своевременным средством снижения аварийности системы трубопроводов и повышения качества их эксплуатации.

1.4. Цели исследования

В настоящее время мониторинг и управление состоянием ВРС осуществляется по следующим направлениям:

1.Использование статистико-вероятностного расчета старения трубопровода, в результате которого прогнозируется интенсивность проведения работ реновации [19].

2.Анализ условий эксплуатации участка трубопровода, визуального и измерительного контроля, где в качестве параметра оценки состояния используется расчет остаточного срока службы трубопровода от момента контроля до аварийного состояния [18].

3.Статистическая обработка данных о повреждениях на водораспределительной сети за последние несколько лет [22].

Отметим основные недостатки существующих методов координации работы ВРС, анализа состояния и выбора эффективной стратегии замены стареющей инфраструктуры.

Во-первых, не учитывается неуклонный рост количества повреждений на 1 км водораспределительной сети, требующий тотального обновления и восстановления участков сети. В связи с отсутствием в полном объеме финансирования на проведение работ реновации водораспределительной сети необходимо тщательно планировать и обосновывать затраты производства. Для этого необходимо ранжировать участки ВРС, требующие первоочередных мер, поэтапно решая задачу перекладки или санации (реновации).

Во-вторых, в результате предлагаемых расчетов не учитываются: виды проводимых аварийно-восстановительных работ (история), характер повреждений, объем утечек, а также в системе автоматизированного мониторинга ВРС не учитываются знания главного звена принятия решения – эксперта. Чем сложнее объект моделирования, тем более необходима в системе моде-

лей этого объекта роль эксперта, ведущего в интерактивном режиме вычислительный процесс.

В-третьих, невозможность в условиях насыщенной инфраструктуры города проводить натурные измерения толщины стенки трубопровода, глубины дефекта, скорости коррозии, необходимые для расчета остаточного срока службы трубопровода.

Целью научных исследований является снижение аварийности водораспределительной сети путем разработки и применения новых методов, математических моделей и программных средств, обеспечивающих своевременное выявление аварийно-опасных участков, выбор способа реновации таких участков и составление расписания работ с учетом ограниченности используемых ресурсов.

Результаты исследований позволят:

- автоматизировать процесс управления состоянием участка водораспределительной сети в условиях неопределенности за счет разработки метода поддержки принятия решений по оценке состояния, планированию и организации работ реновации на ВРМ;
- создать экспертную систему, которая в практической деятельности предприятия водоснабжения наилучшим образом обеспечит решение задач оперативного отслеживания эволюционных изменений технического состояния участков трубопровода, своевременной ликвидации неудовлетворяющих эксплуатационным характеристикам аварийно-опасных участков с выбором рекомендуемого способа реновации, распределения ограниченных ресурсов между ремонтными службами и между аварийно-ремонтными бригадами;
- повысить экономическую эффективность работы системы за счёт продления эксплуатационного срока отдельных участков и всей водораспределительной сети в целом.

1.5. Выбор математического аппарата

Решение исследуемых задач по идентификации состояния ВРС предполагает наличие априорной информации, описывающей зависимости между состояниями и признаками. Необходимая априорная информация представляется в виде таблиц наблюдения, называемых выборками данных.

Моделирование процесса выхода из строя конкретного участка трубопроводной сети и выбора способа проведения работ реновации выполняется на основе ретроспективных данных предприятия. При этом возникают трудности, связанные с недостаточной полнотой и наличием зашумленности априорных данных, участвующих в моделировании и выявлении существенных параметров.

Выявление существенных параметров по экспериментальным и статистическим данным является трудоемким процессом, так как влияние параметров на состояние ВРС изменяется во времени и пространстве и зависит от ряда факторов, которые не поддаются расчетам и проверке. Кроме того, существующая взаимная корреляция ряда параметров создаёт дополнительные трудности для выделения из них наиболее значимых. Вся информация, характеризующая текущее поведение объекта может быть получена только из не устаревших экспериментальных данных. Этим объясняется повышенный интерес исследователей к разработке эволюционирующих моделей, на основе постоянно обновляемой выборке данных натурных испытаний, представленных в виде таблиц соответствия «вход – выход».

Выборка данных, основанная на наблюдениях, несмотря на то, что она содержит приближенные, а порой и случайные значения, пока остается самым надёжным и наиболее достоверным источником информации для построения математических моделей, приемлемых к использованию в системах поддержки принятия решения.

С учетом вышесказанного, для решения задач настоящего исследования необходимо использовать математический аппарат, который даст возможность с минимальным объемом априорной информации и наличием ошибок в выборке данных построить адекватную математическую модель исследуемого объекта.

Используемые статистико-вероятностные методы расчета старения трубопроводной сети [19,22] требуют построения содержательной аналитической модели сложного объекта управления. При этом возникают трудности при описании физической природы процессов, происходящих в исследуемом объекте, интерпретации полученных количественных показателей, оценки возникающих ошибок. Процессы в исследуемом объекте существенным образом зависят от факторов, о влиянии которых практически ничего неизвестно. Поэтому при построении модели таких объектов неизвестны не только коэффициенты или параметры аналитических выражений, описывающих объект управления, но и вид этих выражений. Поскольку в работе рассматриваются объекты на основе априорной информации с полным описанием возможных их состояний – входом, а также достоверным определением параметров выхода, распределение их по классам, а также полной достоверности определения признаков, то использование выше указанного математического аппарата нецелесообразно.

Наиболее близкий к исследуемой теме метод искусственной нейронной сети [23,24,25], однако использования данного метода, как будет показано далее, не обеспечивает оптимального решения задач в исследовании, которые требуют более точных критериев оценок, быстроедействие, эффективности вычислений при малом числе наблюдений. Кроме того, коэффициенты модели не вычисляются на обучающей последовательности, а подбираются по алгоритмам стохастической аппроксимации, метод отбора моделей выполняется по критерию вида скалярного произведения.

Для решения задачи структурно-параметрической идентификации с целью получения математической модели изучаемой системы широко используются методы регрессионного анализа. Здесь следует отметить, что существующий принцип расширения исходного базиса переменных для повышения точности модели, часто приводит к противоречивым моделям, поскольку ошибка снижается до тех пор, пока число переменных не превысит число экспериментальных точек. Причем для оценки коэффициентов уравнения и определения структуры входных параметров используется один и тот же критерий, суть которого сводится к минимизации среднеквадратической ошибки. Таким образом, получается бесчисленное множество моделей с нулевой ошибкой и невозможно определить модель оптимальной сложности ввиду неединственности решения.

Задача выбора оптимального решения, которое заключается в максимизации или минимизации некоторой величины, зависящей от управляемых и неуправляемых возмущений и имеющих статистическую природу, традиционно решается с помощью теории статистических решений. Здесь решение принимается только по одному критерию, при этом критическое значение критерия выбирается по уровню значимости, для которого нужны дополнительные критерии и информация. Такой аппарат применим для решения простых задач выбора оптимального решения.

Наиболее полно всем требованиям исследования удовлетворяет математический аппарат метода группового учета аргументов (МГУА). Метод основан на принципах:

- эвристической самоорганизации;
- селекции (последовательного выбора);
- внешних дополнений;
- свободы выбора решений на каждом этапе выбора селекции;
- «от простого к сложному» [26].

Принцип самоорганизации позволяет перейти от расширенного пространства переменных к представлению модели в виде уравнений на различных подвыборках исходных данных, в состав которых входит несколько информативных переменных. Причем каждая такая переменная содержит в себе информацию о множестве коррелированных с ней переменных.

Внешние эвристические критерии селекции, с одной стороны, позволяют учесть различные взаимосвязи переменных, а с другой – увеличивают уровень помех, возрастающий с числом отброшенных коррелированных переменных до того момента, пока результаты моделирования не начнут ухудшаться.

Минимум критерия селекции укажет на оптимальную модель по размеру, равному числу учитываемых уравнений при многомерном выходе, и по сложности, равной числу ненулевых коэффициентов в заданном пространстве переменных.

Таким образом, принцип самоорганизации позволяет успешно решать задачи моделирования в условиях помех и при отсутствии многих переменных.

Принцип внешних дополнений основывается на использовании нескольких критериев, рассчитываемых на различных частях исходной выборки данных. С помощью эвристических критериев задается не только стратегия решений, но и создается возможность использования априорной информации для получения результатов с заданными свойствами. Применение принципа внешних дополнений позволяет при обработке исходных данных, имеющих выбросы и отклонения от нормального закона распределения, производить отбор наименее зашумленных моделей с наилучшими оценками на отдельных подвыборках.

Многорядная процедура принятия решений обусловлена применением ряда критериев. В соответствии с принципом селекции на каждый последовательный этап многорядной процедуры отбираются самые лучшие представители, получаемые на

текущем этапе. Здесь следует отметить явный недостаток теории статистических решений, где не учитывается принятие нескольких последовательных решений во времени.

Необходимым условием реализации принципа самоорганизации в многорядной процедуре принятия решений по некоторым критериям является нарастание сложности задач, решаемых на каждом шаге. За счет генерации более сложных структур модели и их селекции на каждом шаге появляется возможность решения задач, в которых число переменных больше числа наблюдений и решается взаимокоррелированность переменных в пользу одной из них, дающей наилучшие оценки с точки зрения критерия селекции.

Таким образом, метод группового учета аргументов автоматически решает задачу структурно-параметрической идентификации на основе известной выборки наблюдений, заданного класса моделей (линейной, квадратичной, полиномиальной и др.) и критерия селекции.

Математический аппарат выбранного метода предполагает, что исходными данными для решения задачи структурно-параметрической идентификации является ограниченный объем наблюдений

$$N : \{\bar{x}_1, y_1\}; \{\bar{x}_2, y_2\}; \dots; \{\bar{x}_n, y_n\},$$

где векторы входных наблюдаемых параметров $\bar{x}_i, i = \overline{1, n}$, образуют матрицу состояний

$$\mathbf{X} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_p]$$

размерности $n \times p$, а наблюдаемые выходные параметры $y_i, i = \overline{1, n}$, являющиеся предметом моделирования, образуют выходной вектор размерности $n \times 1$

$$\bar{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}.$$

Конечным (искомым) результатом задачи структурно-параметрической идентификации является функциональную зависимость

$$\bar{y} = F(\mathbf{X}),$$

или

$$y_i = f_i(\bar{x}_i) = f(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{ip}), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, p},$$

где $f_i(\cdot)$ – элементарная функция в виде степенного полинома, эквивалентная нескольким рядам «частных» описаний [27-29]; p – количество независимых переменных; n – количество экспериментальных данных

Поскольку объектом исследования являются работы реновации на водораспределительной сети, то необходимо определить участки трубопровода, требующие первоочередных мер санации или перекладки. Для определения таких участков предлагается спрогнозировать их состояние по известному перечню существующих параметров. При этом параметры должны достаточно полно описывать состояние участка и выбираться с учетом тех-

нической возможности их определения. Каждому набору параметров соответствует определенное состояние участка, а описание состояний и их распределение по классам задается с помощью таблицы соответствия. Считаем также, что задача отнесения набора признаков к определенному классу состояния участка решена.

Водораспределительная сеть характеризуется набором параметров, которые отображают поведение и учитывают условия его функционирования во взаимодействии с внешней средой. Критерием выбора исходной информации для построения модели служит её назначение и данные, характеризующие условия функционирования объекта управления. Состав моделируемых переменных выбран с учетом требований по составлению набора показателей, необходимых для обязательного анализа в целях принятия достоверных решений. Состав параметров, на основе которых возможно определить состояние рассматриваемого участка ВРС можно классифицировать на следующие четыре группы характеристик:

технические: диаметр, глубина заложения, материал, давление;

статистические: бригада, выполнявшая ремонтно-восстановительные работы, вид повреждения, вид проводимых работ, объем утечки при повреждении, месяц повреждения, потери воды при ликвидации повреждения;

расчетные: количество дней ликвидации повреждения, среднее количество месяцев безаварийного состояния участка;

экспертные: возможность дополнительного строительства, характер участка, способ реновации.

Выбранные параметры отражают природно-техногенные факторы, подлежащие фиксации, наблюдению и анализу.

С формальной точки зрения математическое представление объекта во времени, когда параметры системы связаны функциональным отношением, представим в виде:

$$\bar{y} = F(\mathbf{X}, \bar{b}, \bar{e}), \quad (1.1)$$

где \bar{y} – вектор зависимых (выходных) переменных размерности $n \times 1$; \mathbf{X} – матрица независимых (входных) переменных размерности $n \times p$; \bar{b} – вектор искомых параметров размерности $p \times 1$; \bar{e} – вектор возмущений размерности $n \times 1$; p – количество независимых переменных; n – количество экспериментальных данных; F – искомый закон функционирования системы.

В состав параметров независимых переменных входят детерминированные и стохастические составляющие, в зависимых переменных – только стохастические.

Такое математическое описание модели обладает рядом принципиальных особенностей. Поскольку рассматриваемая структура (1.1) связана с исследованием объекта во времени, то динамическая модель отражает её переходные свойства в течение заданного интервала времени. Вместе с тем определение большинства параметров, описывающих состояние исследуемого объекта, является выборочным и происходит по мере накопления информации, что обуславливает целесообразность рассмотрения дискретных представлений.

С формальной точки зрения задача исследования сводиться к решению задач структурной и параметрической идентификации на некотором классе моделей. Структурная идентификация заключается в определении искомой функциональной зависимости F на различных значениях вектора \bar{b} , и, соответственно, пара-

метрическая идентификация состоит в определении неизвестных параметров \bar{b} .

Для поддержки принятия решений по оценке состояния и мониторинга участка ВРС необходимо определить первоочередные участки трубопровода для проведения работ реновации путем рассмотрения последовательности входных и выходных данных наблюдений $Z^n = (\bar{u}^n, \bar{y}^n) = \{[u_1, u_2, \dots, u_n]^T; [y_1, y_2, \dots, y_n]^T\}$.
Причем

$$u = (P_j, Q_j, t), \quad j = \overline{1, n}, \quad (1.2)$$

$$y = T_j, \quad j = \overline{1, n}, \quad (1.3)$$

где P_j – техническая информация о j -м участке трубопровода; Q_j – статистическая информация о предыдущих ремонтах j -го участка трубопровода; t – заданный период времени; n – число участков трубопроводов, T_j – среднее время безаварийного состояния участка трубопровода.

Модель прогноза выхода из строя участка трубопровода представим в виде детерминированного уравнения:

$$T_j = F(\bar{x}_j, t) + \varepsilon, \quad j = \overline{1, n}, \quad (1.4)$$

где T_j – расчетные значения среднего времени безаварийного состояния j -го участка трубопровода; F – оператор модели прогноза выхода из строя участка трубопровода; \bar{x}_j – измеренные

значения параметров j -го участка трубопровода, $\bar{x}_j = \bar{p}_j + \bar{q}_j$; \bar{p}_j – техническая информация о j -м участке трубопровода; \bar{q}_j – статистическая информация о предыдущих ремонтах j -го участка трубопровода; t – заданный период времени; ε – случайная величина, представляющая погрешность измерений; n – число участков трубопроводов.

Модель выбора способа проведения работ реновации на водораспределительной сети представим в следующем виде:

$$Y_j = F_0(\bar{x}_j, \bar{z}_j, t) + \eta, j = \overline{1, n}, \quad (1.5)$$

где Y_j – способ проведения работ реновации j -го участка трубопровода; F_0 – оператор модели выбора способа реновации участка трубопровода; \bar{x}_j – значения параметров j -го участка трубопровода, $\bar{x}_j = \bar{p}_j + \bar{q}_j$; \bar{p}_j – техническая информация об j -м участке трубопровода; \bar{q}_j – информация об измеренных значениях параметров j -го участка трубопровода; \bar{z}_j – дополнительные априорные данные, экспертные оценки; t – заданный период времени; η – случайная величина, представляющая погрешность измерений и ошибки задания дополнительных априорных данных, экспертных оценок; n – число участков трубопроводов.

Исходя из этого, задачу идентификации моделей (1.4) и (1.5) сформулируем как задачу определения таких операторов моделей F , F_0 , которые были бы близки к операторам объекта Ω , Ω_0 , т. е. $F \approx \Omega$, $F_0 \approx \Omega_0$. В качестве критерия оценки ве-

личины ошибки выбрана сумма квадратов отклонений выходов объекта и модели на заданной системе точек x_1, x_2, \dots, x_n

$$E_j = \left| \bar{y}_j - \bar{y}_j^M \right|^2 = \sum_{i=1}^n (y_{ji} - y_{ji}^M)^2 \rightarrow \min, \quad j = \overline{1, n}. \quad (1.6)$$

Степень близости выходов объекта и модели определим с помощью среднеквадратичного отклонения

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_{ji} - y_{ji}^M]^2}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (1.7)$$

Полученная модель считается адекватной при условии $\sigma \leq \zeta$, где ζ — заданное положительное число.

Предложенный подход имеет преимущества перед существующими способами оценки состояния ВРС, что основывается на реальных данных описывающих состояние ВРС, используя знания эксперта и возможности интеграции в контур экспертной системы с целью повышения эффективности и достоверности принятия решений.

Одним из критериев использования выбранного математического описания является предположение о том, что все основные тенденции развития процессов в ВРС отражены в таблице наблюдений и имеют несильно выраженный инерционный характер. Для исследования процессов, происходящих в ВРС, выбран отрезок времени, включающий четыре времени года, что позволяет составить полную картину состояния ВРС с учетом сезонности работ, влияния зонального фактора (изменение климата и состояние почвы, обусловленные сменой температур, и т.п.).

Задачи изучения объекта, выбора принципа классификации состояний объекта, составление перечня существенных признаков и отнесение набора признаков определенному классу имеют специфический характер и во многом зависят от физической природы объекта исследования. В задачах оценки состояния участка трубопровода и управления работами реновации на ВРС математические модели, как правило, являются нелинейными, так как они должны отражать реальные физические нелинейные процессы, протекающие в них. При этом параметры этих процессов связаны между собой физическими нелинейными законами. Поэтому в общем случае математические модели, используемые для исследования реального объекта, могут быть детерминированными или стохастическими [30]. При этом модель должна учитывать:

текущее состояние выбранного участка водораспределительной сети и последовательность предыдущих его состояний;

влияние неконтролируемых факторов среды на поведение выбранного участка трубопровода;

предыдущее влияние принятых решений и внешних условий на поведение исследуемого участка ВРС.

В соответствии с вышеизложенным основная задача исследования формулируется следующим образом. Дана таблица экспериментальных данных, которая соответствует выражению:

$$(x_{ji}, \bar{y}_i), \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, k}, \quad (1.8)$$

где n – число наблюдений; k – число переменных.

Зависимость между входными и выходными данными представим в виде обобщенного полинома Колмогорова-Габбора:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{j=1}^n \sum_{l \leq j} a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j \leq i} \sum_{k \leq j} a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots, \quad (1.9)$$

где a_0 – свободный член; a_i – линейный коэффициент; a_{ij} – коэффициент парного взаимодействия; a_{ijk} – квадратичный коэффициент; x_i, x_j, x_k – входные переменные, описывающие состояние объекта.

Обозначим: $\bar{a}^T = (a_0, a_1, \dots, a_n, \dots)$. Здесь \bar{a}^T – вектор-строка неизвестных коэффициентов в (1.9) размерности q .

Для определения вектора \bar{a} математической модели по данным \bar{y}_i и $\bar{x}_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ji})$, где $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, k}$, применим метод наименьших квадратов (МНК).

Необходимо, используя метод группового учета аргументов, решить задачу аппроксимации таблично заданной функции k переменных (1.8) полиномом (1.9), заменяя многоэтапной процедурой решения большого числа простых задач аппроксимации табличных данных функциями двух переменных – полиномами (1.9). При этом на каждом этапе этой процедуры производится отбор «наилучших» полиномов, которые используются на следующем этапе в качестве аргументов новых полиномов. Продолжение построения сложной функции продолжается до тех пор, пока не будет достигнута необходимая точность описания табличных данных некоторой математической зависимостью. В качестве внешнего критерия, который оценивает меру совпадения выхода модели и наблюдаемого выхода, используется критерий регулярности:

$$\bar{\varepsilon}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - f(\bar{x}_i))^2, \quad \bar{\varepsilon}^2 \rightarrow \min, \quad (1.10)$$

где n – количество наблюдений, y_i – действительное значение выходной величины, $f(\bar{x}_i)$ – значение выходной величины, рассчитанное по модели.

В результате моделирования выбирается одна модель, которая имеет минимальную величину среднеквадратического отклонения между расчетными $f(\bar{x}_i)$ и фактическими y_i значениями.

В целях обеспечения снижения аварийности ВРС за счет своевременного автоматизированного выявления аварийно-опасных участков и выбора способа проведения работ реновации на ВРС необходимо разработать экспертную систему на основе построенных моделей прогноза выхода из строя участка ВРС и выбора рекомендуемого способа его обновления или восстановления.

1.6. Задачи исследования

Для достижения поставленной цели (подраздел 1.4) необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ особенностей современной системы водоснабжения как объекта управления, а также функциональных связей в организационной структуре подсистемы контроля и мониторинга состояния участков водораспределительной сети.

2. Разработать математические модели прогноза выхода из строя конкретного участка трубопроводной сети и выбора способа реновации этого участка, разработать алгоритм составления расписания работ с учетом оптимального распределения ограни-

ченных ресурсов, которые позволят осуществлять автоматизированное принятие решений в задачах оценки состояния участков ВРС, планировании и организации работ реновации. (Разработать математические модели, которые разрешат осуществлять автоматизированную поддержку принятия решений в задачах оценки состояния водораспределительной сети, планированию и организации работ реновации).

3. Разработать метод поддержки принятия решений по оценке состояния участка водораспределительной сети, а также планировании и организации работ реновации на них.

4. Разработать экспертную систему для обработки информации с целью поддержки принятия решений по оценке состояния участка трубопровода, планирования и организации работ реновации на водораспределительной сети на основе моделей самоорганизации и составления расписаний работ с учетом распределения ограниченных ресурсов.

5. Оценить эффективность внедрения и эксплуатации созданной экспертной системы.

РАЗДЕЛ 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РАБОТАМИ РЕНОВАЦИИ

В первом разделе обоснован выбор эвристического подхода в моделировании процесса оценки состояния участка трубопровода и управления работами реновации на водораспределительной сети. Рассмотрим результаты сравнительного анализа свойств, поведения и точностных характеристик моделей, полученных с помощью множественной регрессии, нейронных сетей прямого и обратного распространения, метода группового учета аргументов.

2.1. Исследование основных подходов в задачах оценки состояния участка трубопровода и управления работами реновации на ВРС

Задача автоматизированной оценки состояния участка трубопровода и управления работами реновации на ВРС заключается в определении технического состояния на основе комплексной обработки информации о параметрах сети, анализе и прогнозировании состояния участков трубопровода и поддержки принятия решений для безопасной эксплуатации ВРС.

Проведенный анализ современного состояния исследуемого объекта в первом разделе аргументировал необходимость разработки новых и совершенствование существующих подходов в моделировании задач оценки и мониторинга состояния участка

ВРС. Построение и функционирование систем автоматизированной поддержки принятия решений по управлению работами реновации на ВРС возможно за счет учета неполноты, противоречивости, неоднородности информации на основе построения моделей самоорганизации, построенных с помощью метода группового учета аргументов.

Существующие подходы к решению задач автоматизированного управления можно разделить на: параметрические, непараметрические и эвристические.

Параметрический подход является традиционным методом конструирования закономерностей и связей, которыми объясняется структура данных [1, 31, 32]. Такое конструирование заключается в определении операций над признаками объектов, приводящих к требуемому результату. Невозможность применения этого подхода в задаче оценки и мониторинга состояния ВРС является наложением сильных ограничений на структуру данных, что приводит к линейным моделям с приблизительными оценками их параметров. Область применения ограничивается задачами с известными распределениями и необходимостью набора большой статистики. При этом решение об управляющем воздействии принимается без формирования единого образа объекта мониторинга и окружающей среды в текущем состоянии. А также без прогнозирования развития среды и реакции объекта управления на те или иные управляющие воздействия на него, действующие одновременно с прогнозируемым влиянием среды.

Непараметрический подход основан на описании и фиксации конкретных объектов из предметной области и реализуется в операциях, элементами которых служат объекты как целостные системы [33, 34, 35, 36]. Отличительной особенностью непараметрического подхода является независимость от каких-либо предположений о структуре исследуемых данных и невозможности записи уравнения решающей функции в явном виде. Обоснованные модели могут быть построены в случае большого набора

экспериментальных данных и при относительно равномерном их распределении в пространстве параметров. Это необходимо для доказательства гипотез о характере распределения

Однако использование данного подхода в практических задачах осложняется сложностью получения достаточного количества экспериментальных данных их высокой зашумленности, неполноте и противоречивости.

С помощью эвристического подхода возможно построение модели по выборке данных наблюдений при значительном уровне помех. Высокое качество решающего правила достигается без строгого математического доказательства сходимости решения к глобальному экстремуму.

Эвристический подход основан на определении структуры и механизма связи между элементами исследуемой системы из экспериментальных данных [37,38]. Моделирование с помощью эвристических методов не требует глубокого понимания объекта и механизма действия происходящих в нем процессов. Поскольку алгоритмы эвристических методов успешно работают в условиях априорной неопределенности и выполняют условие постоянного слежения за внешней средой, адаптации и поддержки принятия решений, то они будут рассмотрены более подробно.

Известным представителем эвристического моделирования является метод группового учета аргументов (МГУА) [39]. Число известных методов МГУА непрерывно возрастает, но в основе их построения положен принцип самоорганизации. Суть принципа самоорганизации состоит в переборе моделей, которые постепенно усложняются и согласно минимуму внешнего критерия выбирается наилучшее решение. Необходимость компьютерной поддержки принятия решений в оценке и мониторинге состояния участка ВРС с учетом меняющихся исходных данных приводит к целесообразности использования метода группового учета аргументов, отличительным свойством которого является построение

несмещенных физических моделей исследуемых процессов на будущих выборках данных.

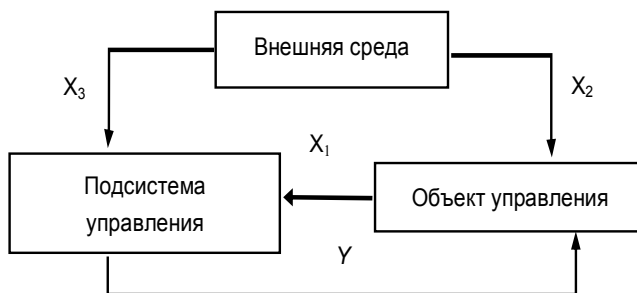


Рис. 2.1 – Традиционная схема автоматизированного управления

Для решения основной задачи оценки и мониторинга состояния ВРС – поддержки принятия решений об эффективном управляющем воздействии - предлагается подсистему управления в классической схеме автоматизированного управления (рис.2.1) представить следующими подсистемами:

1. Подсистема выработки управляющего воздействия, которая включает:

прогноз развития объекта на основе модели, предназначенной для вычисления среднемесячного срока безаварийного состояния участка водораспределительной сети;

выбор способа проведения работ реновации на ВРС посредством модели, идентифицирующей исследуемые работы санации и перекладки.

2. Подсистема поддержки принятия решений, которая представляется в виде расписания проведения работ реновации на ВРС для определения последовательности их выполнения с учетом ограниченности во времени ресурсов с целью вывода трубо-

проводной сети с наибольшей эффективностью в режим безопасной эксплуатации.

Таким образом, структурная схема использования моделей самоорганизации, построенных с помощью метода группового учета аргументов в задачах оценки и мониторинга состояния ВРС и поддержки принятия решений, имеет вид (рис.2.2), где X_1 – факторы предыстории, X_2 – параметры внешней среды, X_3 – управляемые параметры; Y – выходные параметры, характеризующие управляющие воздействия.

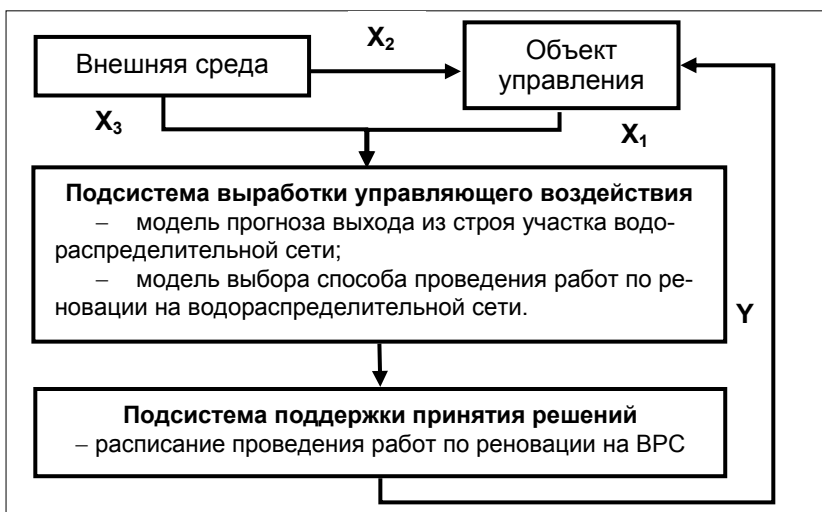


Рис. 2.2 – Структурная схема использования моделей самоорганизации в задачах поддержки принятия решений по управлению работами реновации на ВРС

Преимуществом введения моделей самоорганизации в контур автоматизированного управления работами по реновации

ВРС дает возможность формирования управляющих воздействий, как результатов моделирования, и в автономном режиме может использоваться в качестве инструмента моделирования.

Поскольку ВРС относятся к системам, для которых характерна динамичность развития, многомерность внешних факторов, стохастичность результатов измерения, неполноты информации, то моделирование предполагает определение вида и параметров модели с наилучшим приближением рассчитанных выходных данных к экспериментальным.

Применение имитационного моделирования требует глубокого изучения моделируемых объектов для составления математических уравнений всех элементов и выбора количества уравнений, оптимально описывающих объект и достаточно большого объема априорной информации [40,41]. Математическое описание изменений, происходящих в ВРС на длительных промежутках времени неизбежно приведут к построению сложной модели, и будут некорректными из-за случайных отклонений.

Аналитическое моделирование имеет преимущества при идентификации и выявлении закономерностей в объекте [42,43]. Практическое применение аналитических моделей в задачах оценки и мониторинга состояния ВРС обусловлено сложностью и многообразием процессов, происходящих в трубопроводной сети. Недостаточная изученность физико-химических закономерностей исследуемых процессов и ограниченность информации объясняет нецелесообразность использования аналитического моделирования.

Использование нейросетевых моделей в реальных системах управления затруднено необходимостью подбора и сложной настройки процедуры обучения, что требует специальной подготовки лица принимающего решения (ЛПР), а также увеличивает время обработки информации.

Модели регрессионного типа успешно определяют зависимость одной переменной от большого числа одновременно и совокупно действующих объясняющих переменных [44]. При этом накладываются ограничения на необходимость большого объема исследуемой выборки данных, однородности и возможности математического описания совокупности данных непрерывными функциями. Достаточно высокая точность решающего правила определяется при условии отображения классов объекта в пространстве признаков компактными геометрическими структурами.

Использование моделей самоорганизации, построенных с помощью МГУА, для целей автоматизированной оценки и мониторинга состояния ВРС является мало исследованной предметной областью. Процессы, происходящие в ВРС, имеют стохастический характер и требуют принятия правильного решения в реальном времени обработки информации и управления. При этом водораспределительная сеть призвана обеспечить не только хозяйственные потребности общества, но и реализовать необходимые экологические функции.

Рассмотренные выше подходы требуют дальнейших исследований, поскольку имеют различные характеристики и области применения.

2.2. Сравнительный анализ свойств моделей прогноза безаварийного состояния участка водораспределительной сети

Для определения модели оптимальной сложности необходимо провести структурную и параметрическую идентификацию на выбранных классах моделей (1.4) и (1.5), которая заключается в определении наилучшей зависимости, и оценки её параметров.

Выбор способа идентификации модельных параметров определим экспериментально путем сравнительного анализа моде-

лей регрессии, подходов на основе нейронных сетей и метода группового учета аргументов.

Таким образом, предлагается рассмотреть следующие подходы определения наилучшей математической зависимости для построения модели прогноза выхода из строя участка трубопровода:

линейной множественной регрессии;

нелинейной множественной регрессии;

искусственных нейронных сетей обратного распространения;

искусственных нейронных сетей прямого распространения

аппроксимация данных с помощью модели Колмогорова-Габбора (метод группового учета аргументов).

2.2.1. Содержательная постановка задачи прогноза безаварийного состояния участка ВРС

Наличие в достаточном объеме апостериорной информации для определения параметров модели является одним из условий выполнения процедуры прогнозирования. Для определения первоочередности проведения работ по реновации ВРС предлагается спрогнозировать выход из строя участка трубопровода по техническим и статистическим данным коммунального предприятия «Производственно – технологическое предприятие «Вода» г. Харькова.

Анализу подвергнем участки ВРС, имеющие два аварийных повреждения в год. В данном случае обучающая выборка содержит 284 записи, включающих, согласно модели (1.4), девять входных статистических параметров: x_1 – бригада, выполнявшая ремонтно-восстановительные работы; x_2 – характер повреждения; x_4 – вид проводимых работ; x_5 – объем утечки при поврежде-

нии, m^3 ; x_6 – количество дней ликвидации повреждения; x_7 – месяц повреждения; x_9 – вид грунта, технические: x_3 – диаметр трубопровода, мм; x_8 – глубина заложения трубопровода, м; и один выходной параметр y_1 – количество месяцев безаварийного состояния участка водораспределительной сети.

Ремонтно-восстановительные работы проводят девять бригад, которые разделены по соответствующим административным районам города.

На водораспределительной сети распространены и фиксируются повреждения имеющие характер свища, перелома, трещины, стыка соединения и прочие.

Вид проводимых аварийно-восстановительных работ включает ремонт и замену участка трубопровода.

Вид грунта делится на глину, песок и суглинок.

Каждый участок характеризуется указанным набором входных параметров и рассчитанным выходным параметром. Таким образом, процесс работы системы прогнозирования заключается в процедуре анализа предшествующего набора параметров объекта, и выдаче выходного значения, которое предскажет реакцию объекта, описанного данным набором параметров.

Перейдем к рассмотрению перечисленных подходов.

2.2.2. Прогнозирование методом множественной линейной регрессии

Поскольку на время безаварийного состояния ВРС влияет большое число совместно и одновременно действующих факторов, исследуем зависимость одной переменной y от нескольких

объясняющих переменных x_1, x_2, \dots, x_p , используя метод множественной регрессии.

Модель линейной множественной регрессии, в общем виде, может быть записана следующим образом [45]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p + e, \quad (2.1)$$

где b_0, \dots, b_p – коэффициенты уравнения регрессии;
 x_1, x_2, \dots, x_p – входные параметры уравнения регрессии;
 e – отклонение (рис. 2.3).

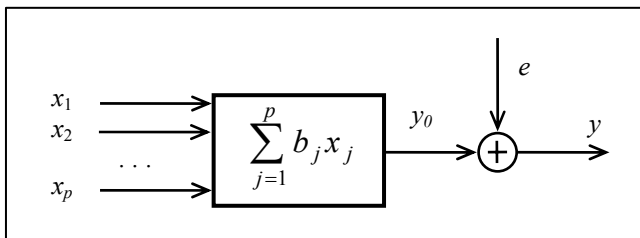


Рис. 2.3 – Структурная схема линейной множественной регрессии

На основании проведенного факторного анализа была осуществлена структурная идентификация модели и определены значимые переменные. Далее с помощью метода наименьших квадратов решена задача параметрической идентификации. Расчеты производились с помощью программы Statistika 6.0. Результаты оценки модели множественной регрессии сведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты оценки модели линейной множественной регрессии

Характеристика модели	Оценка
Множественный коэффициент корреляции (Multiple R)	0,568
Коэффициент детерминации R	0,32
Скорректированный коэффициент детерминации (adjusted R)	0,3
Стандартная ошибка оценивания (Standard error of estimate)	2,382
Стандартная ошибка оценки свободного члена (Std. Error)	1,425

В результате моделирования получена следующая многофакторная модель:

$$y = a_0 + 0,4173x_2 + 0,0976x_6 - 0,4755x_7 \quad (2.2)$$

Результаты моделирования с помощью множественной линейной регрессии отображены на графике (рис.2.4).

Наглядными анализом адекватности полученной модели является гистограмма распределения остатков (рис.2.5) и график остатков на нормальной вероятностной бумаге (рис.2.6). Здесь под остатками понимается разность между результатами наблюдений и соответствующими значениями, вычисленными с помощью прогнозирующей модели.

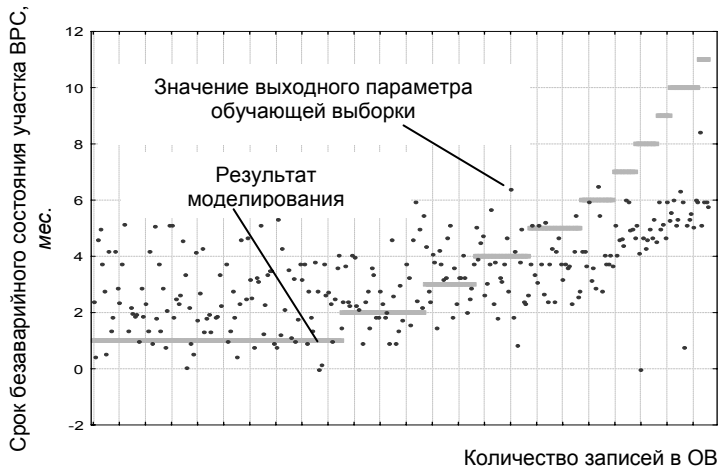


Рис. 2.4 – Сравнение полученного прогноза с реальным сроком безаварийной работы участка ВРС

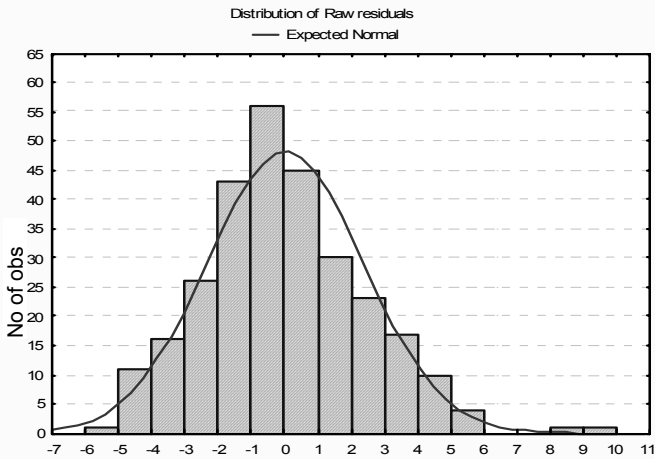


Рис. 2.5 – Гистограмма распределения остатков

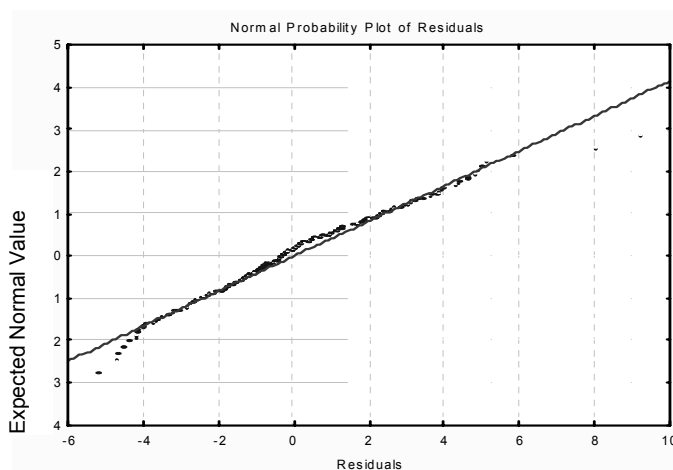


Рис. 2.6 – График остатков на нормальной вероятностной бумаге

Проанализировав гистограмму остатков и график остатков на нормальной вероятностной бумаге, можно сказать, что остатки не подчиняются нормальному закону распределения, что говорит о неадекватности построенной модели. Таким образом, решение поставленной задачи путем построения линейной многофакторной модели является нецелесообразным.

2.2.3. Прогнозирование на основе метода нелинейной множественной регрессии

Сделаем предположение, что время безаварийного состояния ВРС зависит от следующих параметров: бригады, выполнявшей аварийно-восстановительные работы (x_1), вида повреждений (x_2), диаметра трубопровода (x_3). Для оценки вида модели был проведен качественный анализ зависимости величины времени безаварийной работы от указанных переменных (рис. 2.7).

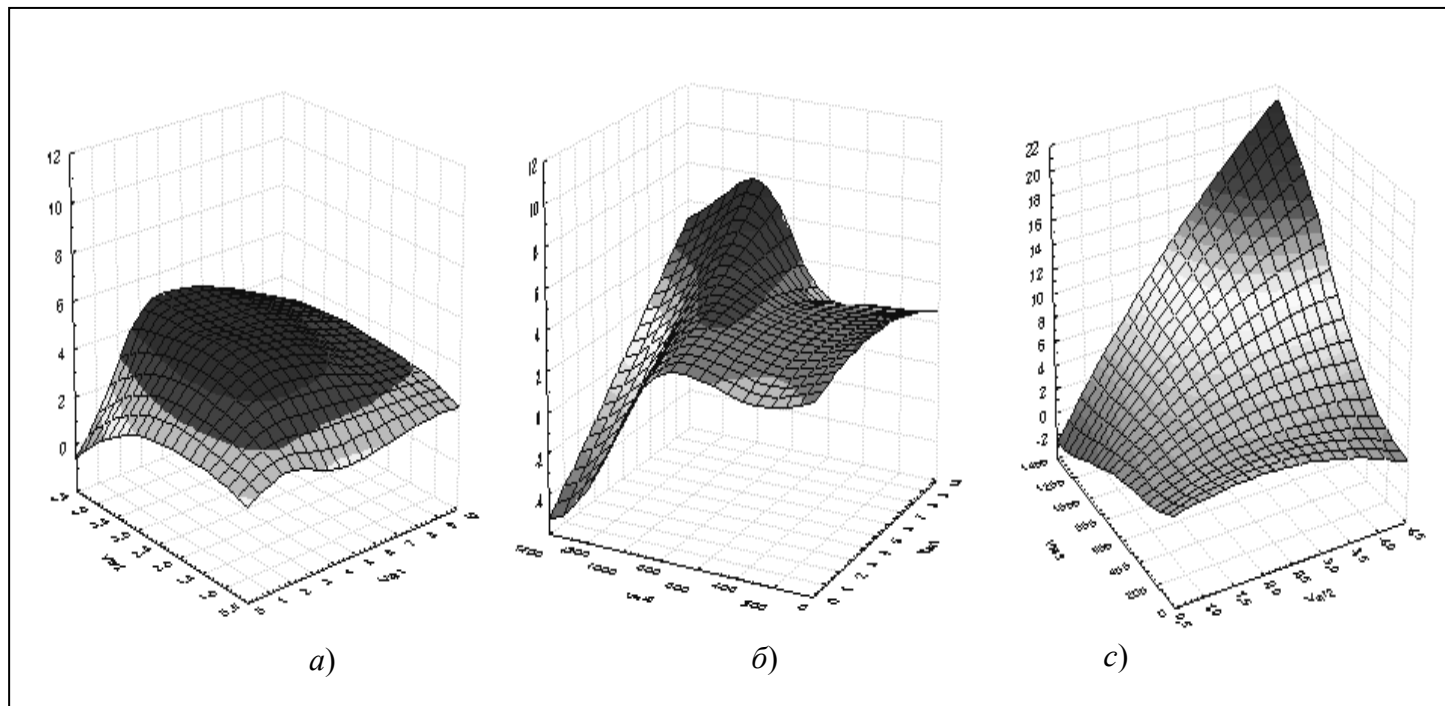


Рис. 2.7 – Графики зависимости времени безаварийной работы от независимых переменных:
а) $y(x_1, x_2)$, б) $y(x_1, x_3)$, в) $y(x_2, x_3)$

Исходя из анализа полученных графиков экстраполированных поверхностей на основании исследуемой выборки, можно выдвинуть предположение о зависимостях между переменными и тогда рассматриваемая нелинейная модель будет иметь следующий вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2^2 + b_3 \log x_3 \quad (2.3)$$

Аналогично линейной регрессии идентификация параметров модели осуществляется согласно методу наименьших квадратов. В результате получена нелинейная модель следующего вида:

$$y = b_0 + 0,012x_1 + 0,116x_2 - 0,126 \log x_3 \quad (2.4)$$

О неадекватности полученной модели можно судить по полученным значениям оценки модели (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Результаты оценки модели нелинейной множественной регрессии

Характеристика модели	Оценка
Множественный коэффициент корреляции (Multiple R)	0,16
Коэффициент детерминации R	0,025
Стандартная ошибка оценивания (Standard error of estimate)	2,83
Стандартная ошибка оценки свободного члена (Std. Error)	0,32

Кроме того, гистограмма остатков модели (рис. 2.8) и график остатков на нормальной вероятностной бумаге (рис. 2.9) демонстрируют значительное несоответствие между исходными параметрами и значениями, вычисленными с помощью полученной модели прогноза.

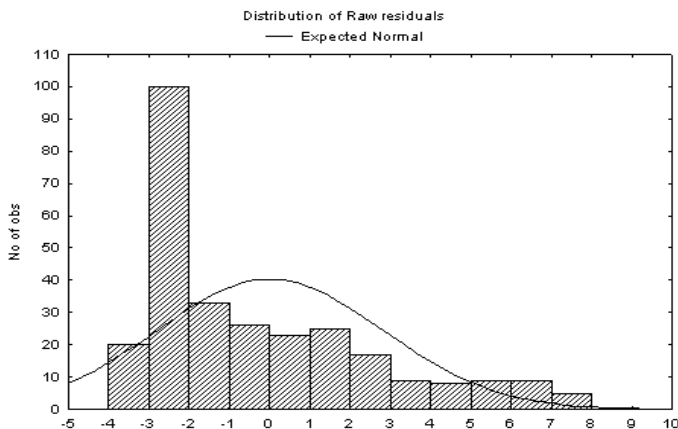


Рис. 2.8 – Гистограмма распределения остатков

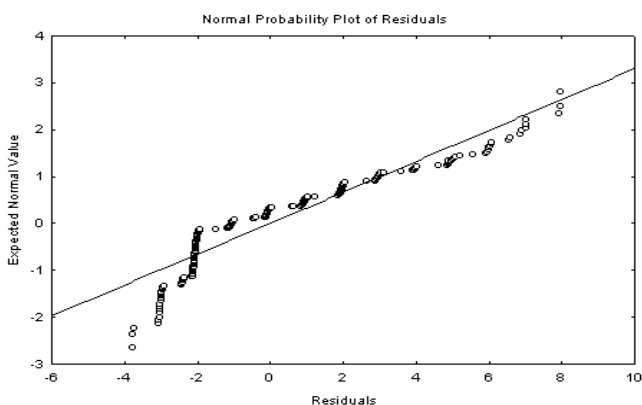


Рис. 2.9 – График остатков на нормальной вероятностной бумаге

2.2.4. Прогнозирование на основе искусственных нейронных сетей

Постановка задачи построения модели для прогнозирования выхода из строя участка трубопровода с применением ИНС сводится к аппроксимации функции от нескольких переменных в виде нелинейной функции (1.4).

Нейронная сеть обратного распространения. Для построения модели прогноза выхода из строя участка ВРС была обучена искусственная нейронная сеть по алгоритму обратного распространения ошибки. Для прогнозирования используется сигмоидальная нейронная сеть с одним скрытым слоем, и количеством входных нейронов равным размерности входного вектора. Количество нейронов скрытого слоя определяется числом распознаваемых классов. Для обучения нейронной сети и расчета ошибок прогноза использовалась программа собственной разработки Expert. Результаты прогнозирования оценивались с помощью следующих методов оценки ошибок:

1. Измерение точности прогноза путем усреднения величины ошибки прогноза в тех же единицах, что и исходный ряд – среднее абсолютное отклонение (Mean Absolute Derivation, MAD):

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |y_t - y'_t|, \quad (2.5)$$

где n - количество наблюдений; y_t - значение показателя в момент времени t ; y'_t - прогнозируемое значение показателя в момент времени t .

2. Вычисление среднеквадратической ошибки (Mean Squared Error, MSE) подчеркивает большие ошибки прогноза:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - y'_t)^2. \quad (2.6)$$

3. Определение процентных соотношений (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) подчеркивает, насколько велики ошибки прогноза в сравнении с действительными значениями ряда:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|y_t - y'_t|}{y_t}. \quad (2.7)$$

4. Вычисление средней процентной ошибки (Mean Percentage Error, MPE) определяет смещенность прогноза. Несмещенным является прогноз, значение процентной ошибки которого близко нулю. Большое отрицательное процентное отношение указывает на то, что метод прогнозирования является последовательно переоценивающим, положительное значение – последовательно недооценивающим.

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{(y_t - y'_t)}{y_t}. \quad (2.8)$$

После 1000 циклов обучения результаты моделирования сети представлены в виде графика (рис.2.10) и расчетными значениями ошибок прогноза (табл.2.3).

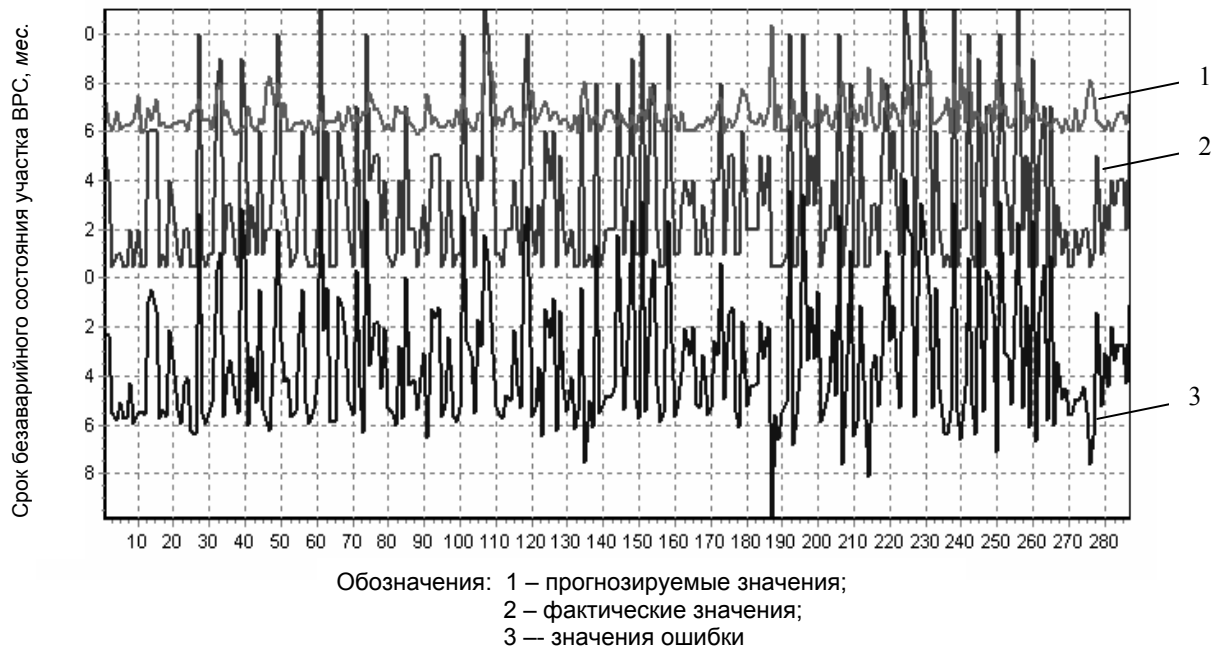


Рис. 2.10 – График обучения ИНС по методу обратного распространения ошибки

Таблица.2.3
Ошибки нейронной сети обратного распространения

Кол-во нейронов в скрытом слое	MAD		MSE		MAPE		MPE	
	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс
12	3,90	5,90	18,9	41,9	4,07	5,92	-4,02	-5,91

Анализируя графики, можно заметить, что имеются отклонения прогнозных значений от фактических. В основном точность прогнозирования снижается на малых и возрастает на больших ожидаемых значениях. Такое представление отклика определяется структурой обучающей выборки (ОВ), используемой для обучения. В описанном эксперименте ОВ имеет неравномерный характер т. е. количество классов обеспечено несравнимым количеством объектов

Одной из причин выбора метода прогнозирования является определение ошибок прогноза. Рассматривая ошибки прогноза, полученные в результате обучения ИНС по методу обратного распространения можно сделать вывод, что при достаточно приемлемых значениях среднего абсолютного отклонения, среднеквадратической ошибки и средней абсолютной ошибки метод прогнозирования оказался последовательно переоценивающим.

Нейронная сеть прямого распространения. Обучение многослойной ИНС и оценка значимости параметров были проведены по алгоритму прямого распространения ошибки.

Для решения задачи необходимо спроектировать структуру ИНС, что предполагает выбор модели нейрона, количества слоев

сети и нейронов в каждом слое, определить характер необходимых связей между слоями [23,38]. В результате экспериментальных исследований, с целью прогнозирования выхода из строя участка трубопровода, выбрана ИНС с одним скрытым слоем и двумя нейронами (рис. 2.11), с функцией активации сигмоидального типа. Количество входных нейронов равно размерности входного вектора, с одним нейроном на выходе. Выходной нейрон выполняет взвешенное суммирование сигналов, поступающих от нейронов скрытого слоя. Добавление веса $W_{\text{смещ}}$, состоящего из одного нейрона, выполняет функцию линейной комбинации подобластей входных данных, полученных в результате разделения нейронами скрытого слоя.

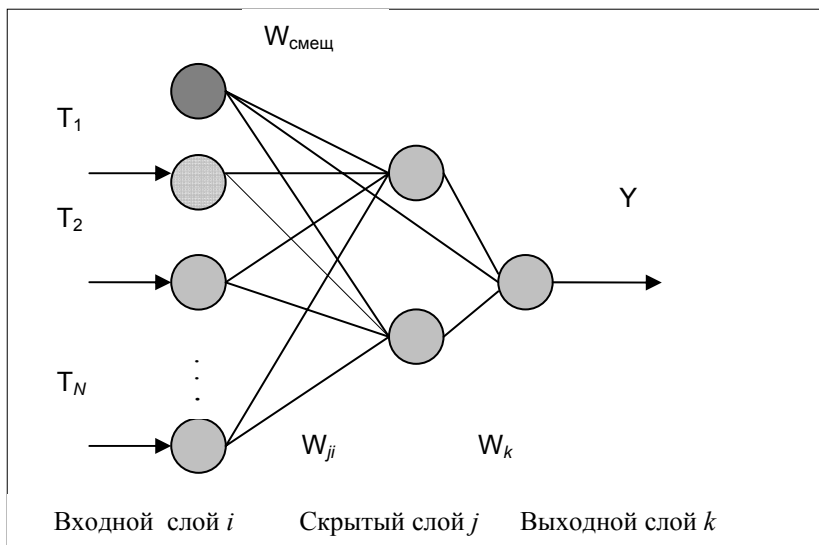


Рис. 2. 11 – Структура искусственной нейронной сети для прогноза выхода из строя участка трубопровода

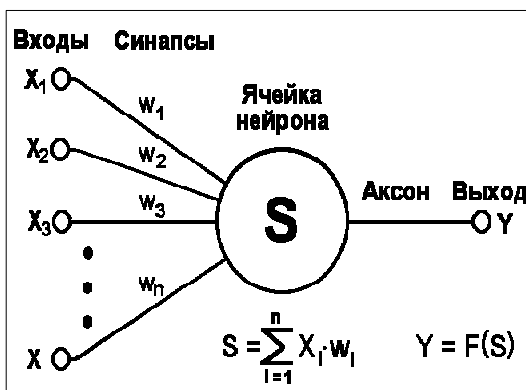


Рис. 2.12 – Модель нейрона

Выбор значимых параметров осуществлялся по следующему алгоритму:

Шаг 1. Обучить ИНС с одним скрытым слоем и двумя нейронами по алгоритму обучения одиночного нейрона (рис. 2.12). Количество входных нейронов равно размерности входного вектора.

Шаг 2. Проверить сеть с помощью тестового набора данных $x = \{x_i^s\}$, $i = 1, 2, \dots, N$, $s = 1, 2, \dots, S$, и вычислить значение ошибки обучения

$$E(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (y_i - d_i)^2, \quad (2.9)$$

где y_i - выходной сигнал i -го нейрона, d_i - ожидаемое значение i -го нейрона.

Шаг 3. Вычислить среднее значение каждого входа сети на наборе данных:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S x_i^s, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (2.10)$$

Шаг 4. Фиксировать каждый вход по очереди, то есть заменить x_i^s на \bar{x}_i для всех тестовых данных, затем пропустить набор тестовых данных через сеть и вычислить значение ошибки при фиксированных входах сети $E(w|_{x_i=\bar{x}_i})$.

Шаг 5. Вычислить коэффициенты значимости $z^B(x_i)$, где $i = 1, 2, \dots, N$:

$$z^B(x_i) = 1 - \frac{E(w|_{x_i=\bar{x}_i})}{E(w)}. \quad (2.11)$$

Шаг 6. Упорядочить $z^B(x_i)$ в порядке убывания. Большее значение $z^B(x_i)$ показывает, что признак x_i является более значимым и оказывает более сильное воздействие на выход сети.

Рассмотрим полученные ошибки прогноза (табл. 2.4) и наилучшие результаты обучения ИНС (рис. 2.13).

Таблица 2.4

Ошибки нейронной сети прямого распространения

Тип ошибки	Обучение на выборке с полным набором параметров	Обучение на выборке после отбора значимых параметров
MSE	0.025	0.023
MAD	0.5	0.43
MAPE	0.15	0.098

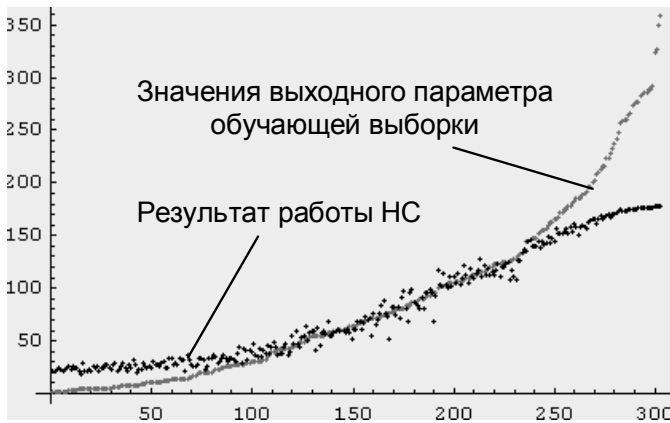


Рис. 2.13 – Результаты обучения нейронной сети прямого распространения

Полученные ошибки обучения ИНС прямого распространения демонстрируют высокую точность прогноза – 97,7% исходных данных успешно распознано. Однако использование данного метода неэффективно при малом числе наблюдений. Кроме того, коэффициенты модели не вычисляются на обучающей последовательности, а подбираются по алгоритмам стохастической аппроксимации, метод отбора моделей выполняется по критерию вида скалярного произведения, а также не определяются значимые параметры.

2.2.5. Модели Колмогорова-Габбора

Модели Колмогорова-Габбора можно рассматривать как область дальнейшего развития прикладного регрессионного анализа. С помощью моделей, построенных методом группового учета аргументов возможно решение задач обнаружения закономерностей, идентификации объектов и пошагового прогноза стохастических процессов [46].

Расчеты производились с помощью модуля алгоритма выбора наилучшей модели из множества моделей Колмогорова-Габбора. Вся выборка делилась на обучающую и проверочную. Для каждой пары параметров x_i и x_j , $i, j \in \{1, 2, \dots, 9\}$ строились частичные описания с использованием линейного и квадратичного полиномов.

В результате исследований получен ряд моделей, среди которых наилучшей моделью выбора, с точки зрения степени регулярности, принят квадратичный полином на втором ряду селекции следующего вида:

$$Y_{0_1} = -0,1486 - 0,1002 \cdot x_1 + 0,1507 \cdot x_2 - 3987 \cdot x_1^2 + \\ + 0,0439 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,1089 \cdot x_2^2;$$

$$Y_{0_31} = -1,4915 + 0,0645 \cdot x_6 + 0,3763 \cdot x_7 + \\ + 0,9211 \cdot x_6^2 + 0,7990 \cdot x_6 \cdot x_7 + 0,3352 x_7^2; \quad (2.12)$$

$$Y_{1_30} = 1,0857 + 3,7726 \cdot Y_{0_1} + 1,7701 \cdot Y_{0_31} + \\ + 2,4707 \cdot Y_{0_1}^2 + 1,4530 \cdot Y_{0_1} \cdot Y_{0_31} + 0,2703 \cdot Y_{0_31}^2$$

где Y_{0_1} , Y_{0_31} – квадратичные частные описания попарных переменных на первом ряду селекции; Y_{1_30} – квадратичное частное описание попарных переменных на втором ряду селекции; x_i – значение i -го параметра в t -ой точке выборки данных ($i = 1, 2, \dots, 9$).

Степень регулярности оценивается по величине среднеквадратичной ошибки σ одной точной переменной на проверочной выборке данных. Для полученной модели $\sigma = 0,201$, другими словами 79,9 % выборки успешно распознано.

Сравнительный анализ методов показал, что наиболее точным оказался метод нейронной сети прямого распространения. Однако использование данного метода в системе поддержки принятия решений будет нецелесообразным по ряду причин: логика принятия решений ИНС скрыта от эксперта; необходимо знать нюансы настройки и обучения нейронной сети; большие объемы выборок замедляют процесс обучения.

Рассмотренные методы регрессионного анализа основаны на жестких требованиях к виду экспериментальных данных и не позволяют достигнуть основных целей моделирования. Это связано с тем, что коэффициенты моделей, полученные методами пошаговой регрессии, могут резко изменяться с появлением новых наблюдений. Поэтому для решения задач прогноза, планирования и управления методы регрессионного анализа являются не достаточно приемлемыми.

В результате сравнения построенных моделей для дальнейших исследований выбран метод группового учета аргументов, который основан на поиске модели оптимальной сложности при помощи перебора множества моделей-претендентов по внешнему критерию. Минимум внешнего критерия указывает оптимальную модель, которая отвечает закону адекватности.

Таким образом, проведенные исследования показали принципиальную возможность формализации процессов проведения реновационных работ по экспериментальным данным, характеризующие состояние водораспределительной сети путем построения математических моделей. В результате сравнения построенных моделей для дальнейших исследований выбран метод группового учета аргументов. Выбор метода обусловлен желанием

детальной формализации, наиболее полной адекватности описания, а также эффективной реализации алгоритма на основе имеющихся данных.

2.3. Разработка моделей самоорганизации для поддержки принятия решений по оценке состояния участка трубопровода и выбора способа реновации

Определено, что для обеспечения эффективного управления предприятием водоснабжения необходимы новые модели и методы, соответствующие внутренней структуре предприятия. Координация и направление деятельности предприятия с помощью автоматизированных систем организует информационные потоки с подготовкой рекомендаций для принятий управленческих решений [47].

2.3.1. Разработка прогнозирующей модели объекта управления

В построенной модели прогноза среднего времени безаварийного состояния участка трубопровода (2.15) выделено четыре информативных аргумента: x_1 – бригада, выполнявшая аварийно-восстановительные работы; x_2 – характер повреждения; x_6 – количество дней ликвидации первого повреждения; x_7 – месяц первого повреждения.

С целью улучшения оценок модели прогноза проведем сравнение влияния выделенных информативных факторов на результаты прогноза.

Предположим, что время безаварийного состояния зависит от бригады, выполнявшей ремонтно-восстановительные работы. Для этого разобьем выборку данных на 9 подвыборок, каждая из

которых содержит информацию, связанную с одной из девяти ремонтных бригад.

Таким образом, в качестве входных переменных использовались следующие восемь значений параметров: x_1 – характер повреждения; x_2 – диаметр участка трубопровода, мм; x_3 – вид ремонтно-восстановительных работ; x_4 – объем утечки, м³; x_5 – количество дней ликвидации повреждения; x_6 – месяц первого повреждения; x_7 – глубина заложения трубопровода, м; x_8 – вид грунта. В качестве выходного y – срок безаварийного состояния участка водораспределительной сети.

Наилучшие модели с точки зрения оценки регулярности получены с помощью квадратичных полиномов на втором ряду селекции. В результате для каждой бригады получены модели с разными статистически значимыми параметрами и величиной среднеквадратического отклонения σ (табл. 2.5).

Предположение о влиянии остальных выделенных информативных аргументов не подтвердилось.

Из таблицы видно, что значимым параметром (знак плюс) для всех бригад определен месяц первого повреждения. Определены значимые параметры для каждой бригады в отдельности с достаточно высоким процентом распознаваемости. Наименее значимый параметр – это вид проводимых аварийно-восстановительных работ, т.е. вне зависимости от работ, которые проводились на месте повреждения, время безаварийного состояния участка не изменится. Выявленная зависимость доказывает необходимость планирования и проведения работ по реновации с целью недопущения аварий на ВРС

Таблица 2.5

Статистически значимые параметры, значение среднеквадратического отклонения для каждой бригады

Параметры	Бригада								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X_1 –характер повреждения				+	+		+	+	
X_2 –диаметр трубопровода, мм		+	+		+	+		+	
X_3 –вид аварийно-восстановительных работ	+						+		
X_4 –объем утечки, м ³		+	+	+					+
X_5 –количество дней ликвидации повреждения				+	+	+	+	+	
X_6 –месяц первого повреждения	+	+	+	+	+	+	+	+	+
X_7 –глубина заложения трубопровода, м	+		+						+
X_8 – вид грунта	+					+			+
σ	0,11	0,08	0,06	0,05	0,11	0,15	0,11	0,19	0,03

Прогнозы, получаемые на известных данных, демонстрируют динамику дальнейшего процесса, если не возникает принципиальных изменений в объекте и во внешних влияющих факторах.

2.3.2. Разработка модели выбора способа проведения работ по реновации участка водораспределительной сети

С целью дальнейшего усовершенствования процедуры поддержки принятия решений управления работами реновации на ВРС необходимо выбрать для конкретного участка трубопровода рекомендуемый способ реновации. Для этого необходимо по-

строить и исследовать модель выбора способа реновации с помощью полинома Колмогорова-Габбора.

Для разработки модели выбора способа проведения работ реновации проанализируем технические, статистические и экспертные данные об участках, требующих проведения работ реновации. Обучающая выборка содержит 89 записей с 9 входными параметрами. К группе технических параметров относятся: x_1 – диаметр трубопровода, мм; x_2 – материал участка трубопровода; x_3 – глубина залегания трубопровода, м.

К группе статистических параметров относятся: x_5 – давление, атм.; x_6 – характер повреждения; x_7 – потери воды, тыс. м³/год. К экспертным параметрам относятся: x_4 – длина участка, км; x_8 – возможность дополнительного строительства; x_9 – характер участка трубопровода, а также выходной параметр y – способ реновации.

Под параметром материал водораспределительной сети рассматривается чугун и сталь.

Параметр дополнительное строительство определяется экспертом и выбирается исходя из технической возможности проведения вспомогательных работ и их необходимости. К таким работам относятся:

строительство одного котлована на два saniруемых участка ВРС;

строительство двух котлованов, вырезки технологических окон, снятие гидрантов и другого оборудования на ВРС.

Характер участка трубопровода классифицируется как прямолинейные, криволинейные, криволинейные радиусом не менее трех диаметров.

В исследовании кроме традиционного способа замены трубопровода, рассматриваются три распространенных метода санации: прокладка полимерных труб внутри защищаемого трубопровода, протягивание внутри трубопровода гибких полимерных рукавов, нанесение на внутреннюю поверхность трубопровода защитного цементно-песчаного покрытия. Нормативно-справочная информация для классификации способов реновации участков водораспределительной сети основана на разработках специалистов «Укркоммунниипрогресс» г. Харькова.

Проанализируем результаты полученной функциональной зависимости при построении модели для выбора способа реновации участка трубопровода с помощью метода группового учета аргументов. Для каждой пары x_i и x_j строим частичное описание, используя линейный и квадратичный полиномы. В результате моделирования для первого ряда селекции получена линейная модель

$$Y_{0_7} = 0,18506 + 0,37643 \cdot x_1 + 1,07851 \cdot x_8 \quad (2.13)$$

с характеристикой качества идентификации – среднеквадратическим отклонением σ равным 0,033. И квадратичная модель с σ равным 0,018 следующего вида:

$$Y_{0_7} = 0,23196 + 0,52016 \cdot x_1 + 0,50598 \cdot x_8 - 0,27276 \cdot x_1^2 - 0,74864 \cdot x_1 \cdot x_8 + 0,27322 \cdot x_8^2, \quad (2.14)$$

где Y_{0_7} – квадратичное частное описание попарных переменных на первом ряду селекции; x_1 – диаметр трубопровода, мм; x_8 – возможность дополнительного строительства.

В результате моделирования средние значения ошибок линейного и квадратичного полиномов в каждой точке обучающей выборки соответственно составляет 0,241 и 0,148.

Качество построенной квадратичной модели наглядно показано на рис. 2.14, где большинство точек полученной модели и фактических значений совпадают, т.е. модель адекватно определяет способы проведения работ по реновации участков ВРС.

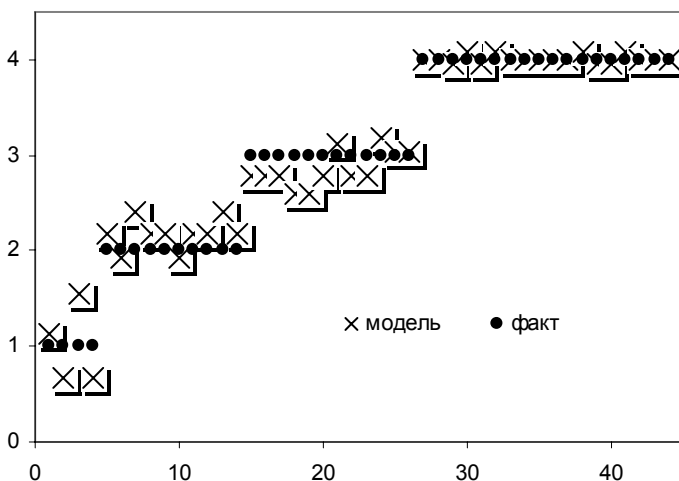


Рис. 2.14 – Результат идентификации способа проведения работ по реновации на основе МГУА

Наблюдаемая несовместенность объясняется совпадением параметров для определения разных способов реновации. Кроме того, линейная и квадратичная модели выделили одни и те же решающие параметры для при принятия решения о способе реновации трубопровода: x_1 – диаметр трубопровода и x_8 – необходимость и возможность дополнительного строительства, что свидетельствует о непротиворечивости полученных результатов.

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод, что модель выбора способа реновации участка водораспределительной сети, построенная с помощью МГУА, с достаточной точностью адекватна и может быть интегрирована в экспертную систему.

2.4. Составление и анализ расписания проведения работ по реновации ВРС

Определено, что на основании технических, статистических и экспертных данных, характеризующих каждый i -ый участок водораспределительной системы, можно вычислить дату прогнозируемого выхода из строя $t_1^{(i)}$ участка ВРС и определить рекомендуемый способ проведения работ реновации выбранных участков. Поскольку для выполнения работ реновации на водораспределительной сети нужны временные, материальные, финансовые и трудовые ресурсы необходимо решить задачу оптимального распределения ограниченных ресурсов в рамках проекта. Поэтому заключительной задачей для поддержки принятия решений по управлению работами реновации ВРС, решение которой рассматривается в монографии, является составление расписания работ в условиях временных и ресурсных ограничений.

В настоящее время из-за простоты программной реализации, наглядности и формализованности представления итоговых от-

четов, на основании которых обосновываются и принимаются решения, наибольшее распространения получили расписания в виде диаграммы Ганта [48].

Алгоритм оптимального по времени распределения ограниченных ресурсов. Существует s различных ресурсов $A_1(t), A_2(t), \dots, A_s(t)$ и условие ежедневного их наличия. Каждая работа (C_i, C_j) выполняется лишь одним из этих ресурсов, причем известно количество k -го ресурса, потребляемое на этой работе в единицу времени и продолжительность выполнения данной работы $t(i, j)$.

Необходимо решить задачу оптимального распределения ресурсов проекта, которое при заданных ограниченных ресурсах обеспечивало бы выполнение всех работ в минимальное время.

Алгоритм решения задачи состоит в выполнении следующих шагов [49]:

Первый шаг

1) После составления линейной диаграммы всех работ определяется время наступления события C_i , которое совпадает с ранним временем $t_p(j)$. Устанавливается критическое время выполнения работ ($T_{кр}$), полные резервы времени всех некритических работ. Проектируется на горизонтальную ось начало и конец каждой работы (C_i, C_j) , левая проекция обозначается $\tau_0 = T_0 = 0$, следующую за ней τ_1 .

2) Рассматриваются работы, которые по плану должны выполняться в промежутке $[\tau_0 = T_0, \tau_1]$. Такими будут все работы

(C_i, C_j) для которых $t(0, j) \geq \tau_1$, а $\tau_0 = T_0 = 0$. Этим работам присваиваются номера в порядке возрастания их полных резервов, а работам с одинаковыми полными резервами ставятся в соответствие номера в порядке убывания их интенсивности (если же интенсивности тоже одинаковы, то таким работам присваиваются номера в любом порядке). Таким образом, критические работы, расположенные над промежутком $[\tau_0, \tau_1]$, при условии, что их полные резервы равны нулю, получают номера. Затем получит номер $k_1 + 1$ некритическая работа, полный резерв которой меньше полного резерва любой другой некритической работы, расположенной над промежутком $[\tau_0, \tau_1]$ (если таких работ с наименьшим положительным полным резервом будет больше, чем одна, то они, как уже указывалось, получают номера $k_1 + 1, k_1 + 2, \dots$ в порядке убывания их интенсивности), и т. д.

3) Суммируется последовательно в порядке возрастания номеров работ используемый на этих работах ресурс (точнее, суммируются их интенсивности). До тех пор, пока получаемая сумма не превзойдет заданного в промежутке $[\tau_0, \tau_1]$ наличия ресурса, работы оставляются в первоначальном положении. Как только для какой-нибудь работы окажется, что после прибавления потребляемого на ней ресурса полученная сумма станет больше наличия в промежутке $[\tau_0, \tau_1]$ ресурса, то начало этой работы отодвигаются вправо к моменту τ_1 и продолжается исследование еще не просмотренных работ.

После окончания просмотра всех работ, расположенных над промежутком $[\tau_0, \tau_1]$, рассматривается общий шаг.

Общий шаг

Пусть уже проделано k шагов алгоритма, так что суммарный ресурс, потребляемый на работах, размещенных над промежутком $[T_0, \tau_k]$, не превышает заданного. Приступаем к $(k + 1)$ -му шагу.

Шаг $(k + 1)$

1) Момент τ_k считаем моментом начала оставшейся части проекта, состоящей из работ, расположенных над промежутком $[\tau_k, T_n]$. Устанавливаем каждую работу (C_i, C_j) так, чтобы ее начало C_i совпадало с новым минимальным временем T_i наступления события C_i (работы, начатые левее τ_k , не сдвигаются). Затем повторяем с рассматриваемой частью проекта все последующие операции действия первого шага. Причем новые полные резервы определяем для всех работ, расположенных правее τ_k , т. е. не оконченных к моменту τ_k . После проектирования начал и окончаний работ на горизонтальную ось времени самая левая проекция будет совпадать с τ_k ; следующую за ней проекция – с τ_{k+1} .

2) Рассматриваются все работы, расположенные над промежутком $[\tau_k, T_n]$. Очевидно, что это те работы (C_i, C_j) , начала C_i которых расположены левее или над τ_{k+1} , а концы C_j расположены правее или над T_{n+1} . Всем рассматриваемым работам присваиваются номера, причем, в зависимости от условий задачи, существуют два способа нумерации:

а) Работы проекта не допускают перерыва в их выполнении. В этом случае в первую очередь присваиваются номера $1, 2, \dots, k_2$ работам, левый конец которых расположен левее τ_k , т. е. тем, которые начаты до момента τ_k и продолжаются после него. Для каждой из этих работ вычисляется разность между ее новым полным резервом и отрезком этой работы от ее начала и до τ_{k+1} , и все работы нумеруются в порядке возрастания этих разностей. Работы же с одинаковыми разностями нумеруются в порядке убывания их интенсивностей. Остальным работам, расположенным над промежутком $[\tau_k, \tau_{k+1}]$, присваиваются номера в той же последовательности, как и в действии 2) первого шага, т. е. критические работы получают номера $k_2 + 1, k_2 + 2, \dots, k_2 + k_3$, в порядке убывания их интенсивности, и т. д.

б) Работы допускают перерыв в своем выполнении. В этом случае присваиваются номера так, как в действии 2) первого шага, т. е. в первую очередь – критическим работам, а затем всем остальным в порядке возрастания их полных резервов времени. При этом если некоторая работа начата левее τ_k и продолжается после τ_k , то ее часть, расположенная правее τ_k , рассматривается как самостоятельная работа.

Действие 3) полностью совпадает с действием 3) первого шага. Причем, если при нумерации а) сдвигу подлежит работа, начатая раньше, чем τ_k , то полностью ее сдвигаем так, чтобы ее начало совпало с промежутком $\tau_k + 1$.

Алгоритм заканчивается, когда просмотрены все работы проекта.

Предлагается следующий алгоритм решения задачи составления и анализа расписания проведения работ реновации на водораспределительной сети:

1. Определить перечень всех участков, требующих проведения работ реновации на ВРС.

2. Установить последовательность выполнения работ на выбранных участках. Для этого необходимо отсортировать список участков трубопровода в порядке возрастания времени прогнозирования выхода из строя $t_1^{(1)} \leq t_1^{(2)} \leq t_1^{(3)} \leq t_1^{(4)} \leq \dots$. Таким образом, в начале списка будут стоять те участки трубопровода, которые уже вышли из строя.

3. Определить продолжительность работ. Расчет продолжительности работ по перекладке ВРС проводится на основе норм ДБН Д.2.2-22-99 [50], для исследуемых способов санации ВРС применяются нормы, разработанные «Укркоммунниипрогресс» г. Харькова.

4. Построить диаграмму Ганта:

от нуля откладываются последовательно работы, у которых время прогнозирования безаварийной работы $t_1^{(i)} = 0$, потом по порядку возрастания отмечаются остальные работы и т.д.;

продолжительность работ определяется временем ремонта $t_2^{(i)}$.

5. Устанавливается количество ресурсов, требуемых для выполнения работ.

6. Оптимизация распределения по времени ограниченных ресурсов по диаграмме Ганта. Анализ обеспеченности работ ресурсами.

РАЗДЕЛ 3

МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ РАБОТАМИ РЕНОВАЦИИ

Во втором разделе для идентификации состояния водораспределительной сети и определения приоритетности проведения работ по реновации разработана модель вычисления среднего срока безаварийного состояния участка трубопроводной сети на основе метода группового учета аргументов. С целью выбора способа проведения работ реновации на водораспределительной сети предложена модель, применение которой сократит время на принятие решений, заменит работу эксперта. Кроме того, разработан алгоритм составления и анализа расписания работ по реновации на водораспределительной сети с учетом оптимального распределения по времени ограниченных временных, финансовых, материальных и трудовых ресурсов.

В настоящем разделе рассматривается вопрос разработки метода автоматизированного принятия решений по управлению работами реновации на водораспределительной сети на основе моделей самоорганизации и алгоритма составления и анализа расписания работ, исследованных в предыдущем разделе.

3.1. Анализ особенностей автоматизированной поддержки принятия решений по управлению работами реновации

Определено, что для увеличения эффективности решения задачи управления работами реновации на водораспределитель-

ной сети необходимо решать вопросы, связанные с оценкой состояния участков трубопровода, определением способа проведения работ и оптимального распределения ограниченных ресурсов для выполнения работ.

Решение вышеперечисленных задач невозможно без включения в контур системы управления работами реновации на ВРС подсистемы автоматизированной поддержки принятия решений. Это обусловлено необходимостью учета следующих сложившихся условий управления работами реновации на ВРС:

1. *Увеличение количества участков водораспределительной сети, требующих проведения работ по реновации.* В этих условиях необходимо не только оперативно реагировать на текущую ликвидацию повреждений, но и планировать стратегические решения по их предупреждению. Это позволит: сократить потери воды; затраты на её обработку и подачу; повысить экологическую безопасность, связанную с качеством воды; снизить количество скрытых утечек, подтоплений зданий, дорог и т. д. Адресный выбор участков водораспределительной сети для проведения работ по реновации усложняется в условиях увеличения количества повреждений, необходимости учета и обработки больших объемов информации, которые включают статистические, технические, экспертные данные, а также данные учета проведенных аварийно-восстановительных работ на поврежденных участках сети.

2. *Многосвязный характер организации работ.* Здесь следует учитывать многоуровневый характер управления, который требует упорядоченности и согласованности связей между структурными подразделениями для планирования и организации работ реновации на ВРС. В результате выбора участков для первоочередных мер по реновации участков ВРС производственно-техническим отделом необходимы расчеты по объемам необходимых материальных, финансовых ресурсов предприятия. Технико-экономическое обоснование и расчет экономической эффек-

тивности проведения запланированных работ проводит планово-экономический отдел.

3. *Изменчивость внешней среды.* Под изменением внешней среды предполагается учет выполненных аварийно-восстановительных работ рассматриваемых участков ВРС. Поскольку работы включают как ремонт, так и замену участка трубопровода, то при составлении перечня участков, требующих проведения работ реновации необходимо учитывать вид выполненных работ.

4. *Ограниченность предприятий, эксплуатирующих ВРС, в материалах, финансах, в сроках проведения работ.* Установившаяся практика финансирования проектов реновационных работ на трубопроводной сети не предусматривает крупных капиталовложений. Поэтому предприятиям водоснабжения необходимо планировать работы с учетом оптимального распределения ресурсов, используя новые методы управления.

Рассмотрим схему автоматизированного управления аварийно-восстановительными работами на водораспределительной сети на примере предприятия водоснабжения г. Харькова.

В настоящее время в коммунальном предприятии «Производственно-технологическом предприятии «Вода» эксплуатируется программное обеспечение, предназначенное для автоматизации рабочего места диспетчера аварийно-восстановительных работ. Созданные электронные базы данных обеспечивают учет и контроль эксплуатационных показателей. При этом такие функции управления как планирование, прогнозирование и генерация проектных решений не выполняются.

Несмотря на очевидную полезность существующего программного обеспечения в задачах слежения за выполнением аварийно-восстановительных работ на участках водораспределительной сети, в тоже время оно не является достаточно гибкой и

эволюционирующей. Отметим наиболее важные недостатки такой системы:

учетные данные системы отражают прошлое состояние объекта управления и в большинстве случаев не позволяют оценивать перспективы его развития;

форма представления данных для анализа и поддержки принятия решений запрограммирована заранее и не может меняться пользователем в процессе эксплуатации системы;

постоянно растущие объемы баз данных требуют больших затрат машинного времени для подготовки данных и оформления результатов, что снижает оперативность принимаемых решений.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что на сегодняшний день недостаточно учтены все особенности функционирования и условия управления работами по реновации на ВРС, что не позволяет определить полный объем, необходимых работ.

В монографии предлагаются модели и методы поддержки принятия решений по управлению работами реновации на ВРС, позволяющие оценивать состояние участков трубопровода, планировать и управлять работами реновации на ВРС с учетом меняющихся условий.

Рассмотрим схему, предлагаемого решения задачи повышения эффективности управления работами по реновации на участках ВРС (рис. 3.1).

Исходной информацией для решения задачи повышения эффективности управления ВРС являются данные о повреждениях на ВРС, характеристики современных технологий восстановительных работ с учетом требований санитарных норм и правил эксплуатации объектов водоснабжения, а также государственных строительных норм. Используя информационные технологии, необходимо выбрать участки ВРС, требующие первоочередных

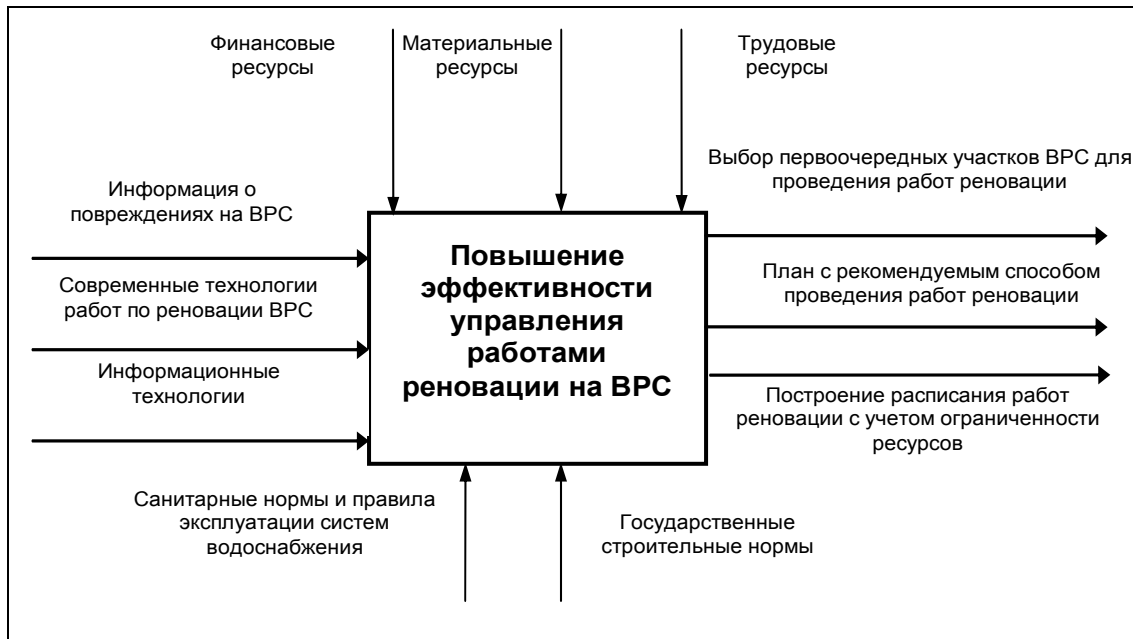


Рис. 3.1 – Схема решения задачи управления работами реновации на участках ВРС

мер для проведения работ реновации на ВРС с определением рекомендуемого способа и составлением оптимального расписания работ с учетом ограниченности финансовых, материальных, трудовых и временных ресурсов.

Место автоматизированной системы в общем контуре системы управления работами реновации на водораспределительной сети показано на рис. 3.2.

В центральной диспетчерской службе предприятия фиксируются и накапливаются технические и статистические показатели состояния ВРС, которые поступают от районных служб водопроводных сетей (СВС) города. Подсистема формирования баз данных представлена программным обеспечением автоматизированного рабочего места диспетчера аварийно-восстановительных работ (АРМ «Диспетчер АВР») [51].

Основным назначением АРМа является обеспечение функций учета данных о повреждениях, ведение и составление принятых форм отчетности.

С помощью разрабатываемой, в рамках монографии, подсистемы автоматизированной поддержки принятия решений по управлению работами реновации на ВРС необходимо решить вопросы моделирования производственных планов на основе технических, статистических, расчетных и экспертных данных.

Информационная схема управления работами по реновации на водораспределительной сети представлена на рис. 3.3

В основе создания автоматизированного управления работами реновации на ВРС лежит метод управления, направленный на решение стратегических планов предприятия, выраженный в виде системы управляющих воздействий.

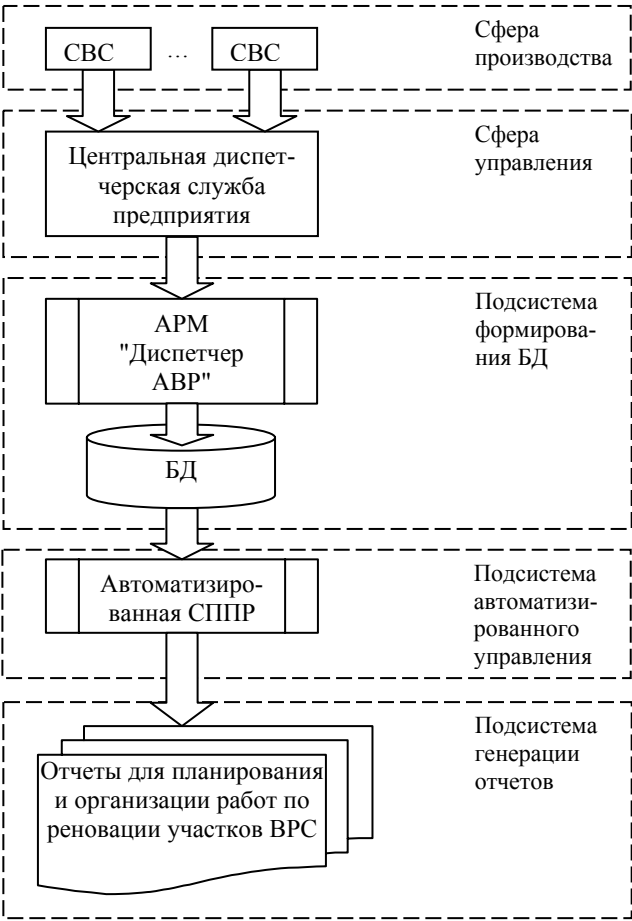


Рис. 3.2 – Схема функционирования автоматизированной системы поддержки принятия решений

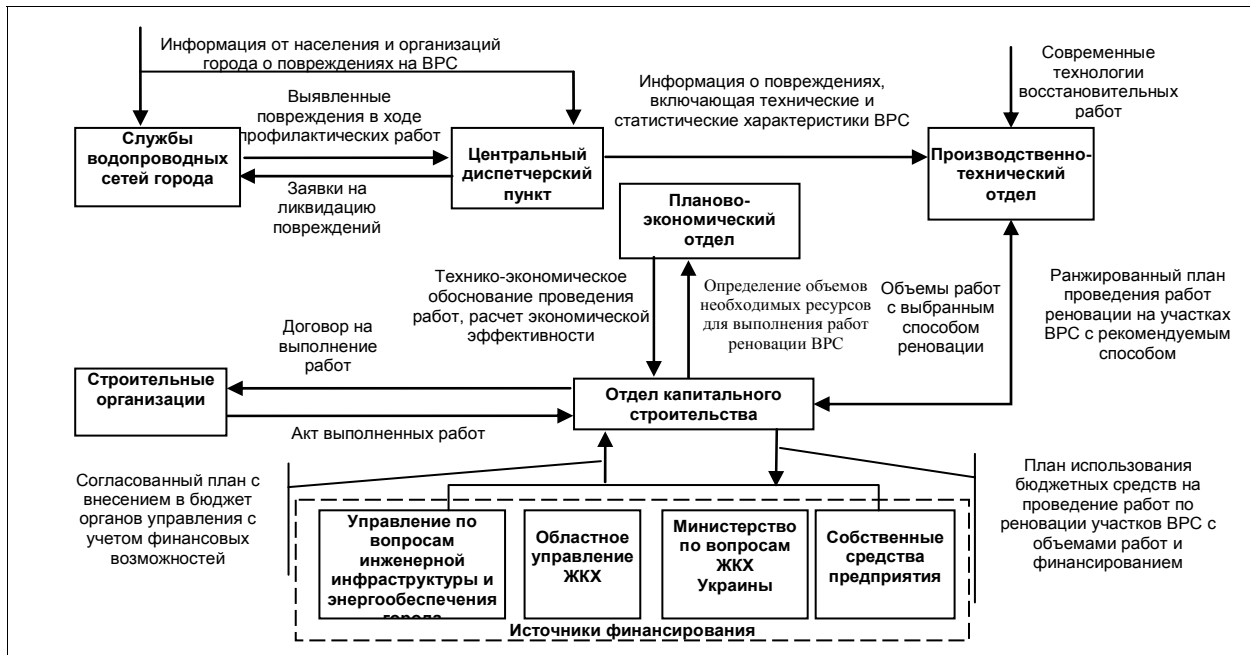


Рис. 3.3 – Информационная схема управления работами реновации участков BPC на примере КП ПТП «Вода»

К числу рассматриваемых вопросов относятся:

разработка метода поддержки принятия решений по управлению работами реновации на ВРС на основе моделей самоорганизации и алгоритма составления расписания работ с учетом ограниченности ресурсов;

обеспечение специалистов полной, оперативной, достоверной информацией;

представление информации в удобном виде для анализа и принятия оперативных и стратегических решений.

3.2. Разработка структуры метода принятия решений по управлению работами реновации с использованием моделей самоорганизации

Определено, что в основе автоматизированного контроля и управления техническим состоянием входящих в состав водохозяйственного комплекса водораспределительных сетей лежит построение математических моделей, которые описывают происходящие физические процессы при разных условиях функционирования объекта управления. Новые возможности для решения задач моделирования процессов по обработке экспериментальных данных открывает метод группового учета аргументов, в основе которого лежит принцип самоорганизации.

Несмотря на то, что задачам построения автоматизированного управления на основе моделирования в управлении предприятиями водоснабжения посвящено много работ [4,6,7,8,9,13,18], ряд вопросов, связанных с обработкой данных и знаний, недостаточно исследованы. Существующие примеры автоматизированного управления современным водохозяйственным комплексом основаны на детерминированных подходах, которые не используются в адаптивном режиме управления, что в

значительной мере снижает достоверность принимаемых решений.

Использование моделей самоорганизации в качестве инструмента для принятия решений в разрабатываемой автоматизированной системе позволяет эффективно отображать динамику и развитие процессов в реальном времени. В связи с этим возникает необходимость разработки эффективного метода, позволяющего использовать модели самоорганизации в практическом приложении с учетом фактической информации об участках водораспределительной сети.

Недостаточность априорной информации, динамические изменения параметров участка водораспределительной сети, сокращение сроков разработки новых систем приводят к необходимости эксплуатации автоматизированного управления в режиме адаптации моделей.

В соответствии с изложенным выше, предлагается использование двух режимов эксплуатации автоматизированной системы поддержки принятия решений: с фиксированными моделями и с перестройкой (адаптацией) моделей.

Для решения задачи автоматизированного управления работами реновации на водораспределительной сети необходимо разработать метод поддержки принятия решений, который позволяет реализовать на основе моделей самоорганизации выявление участков ВРС, требующих первоочередных мер для проведения ремонтно-восстановительных работ на ВРС, определить способ проведения работ, а также составить расписание работ с оптимальным распределением ограниченных ресурсов.

Таким образом, постановка задачи состоит в следующем. Существует оперативная информация о фактическом состоянии участка трубопровода, нормативно-справочная информация (НСИ) и модели самоорганизации для выработки управляющего воздействия.

Входной информацией для решения исследуемой задачи являются:

базы данных учета технических и эксплуатационных показателей, регистрируемых при повреждениях на водораспределительной сети;

нормативно-справочная информация.

К НСИ относятся:

базы данных учета введенных в эксплуатацию участков водораспределительной сети, которые корректируются по мере принятия их на баланс предприятия;

информация с техническими и технологическими характеристиками рассматриваемых способов реновации трубопроводов.

Следует отметить, что отличительные особенности рассматриваемых способов санации определены на основе разработок Украинского научно-исследовательского института прогрессивных технологий в коммунальном хозяйстве «Укркоммуннипрогресс» г. Харькова.

Выходная информация состоит из следующих отчетов:

1. *Отчет с рассчитанными значениями выхода из строя выбранных участков трубопровода.* Представляет собой перечень участков ВРС с адресной привязкой и значением прогноза времени безаварийного состояния этого участка.

2. *Отчет с идентификацией необходимого способа проведения работ по реновации на ВРС.* К предыдущему отчету на основе нормативно-справочной информации добавляются данные, которые определяют необходимый способ реновации участка ВРС.

3. *Отчет-расписание.* Составляется для организации работ по реновации участков ВРС с учетом распределения ресурсных ограничений.

Рассмотрим более подробно структуру метода поддержки принятия решений по управлению работами реновации на водораспределительной сети.

На основе постановки задачи об автоматизированной поддержке принятия решений по управлению работами реновации на водораспределительной сети структура разрабатываемого метода должна включать модели самоорганизации, которые учитывают два режима эксплуатации и алгоритм составления и анализа расписания работ. Схема метода представлена на рис. 3.4.

Структура метода поддержки принятия решений по управлению работами реновации на ВРС на основе моделей самоорганизации и алгоритма составления и анализа расписания работ включает следующие этапы:

Этап 1. Формализация предметной области

Областью экспертизы являются базы данных участков ВРС, на которых зафиксировано два повреждения за предыдущий период времени. Целью исследований этого этапа является формирование исходных данных для выбора параметров с целью построения моделей самоорганизации. Для достижения цели решаются следующие задачи: импорт файлов с ретроспективной и нормативно-справочной информацией; синхронизация данных по общим реквизитам; выполнение вычислений времени безаварийного состояния участка ВРС; при необходимости ручной ввод недостающих параметров.

Этап 2. Выбор параметров для обучения

Суть данного этапа заключается в возможности изменения набора параметров для формирования обучающей выборки.

Этап 3. Построение модели прогноза времени безаварийного состояния участка ВРС

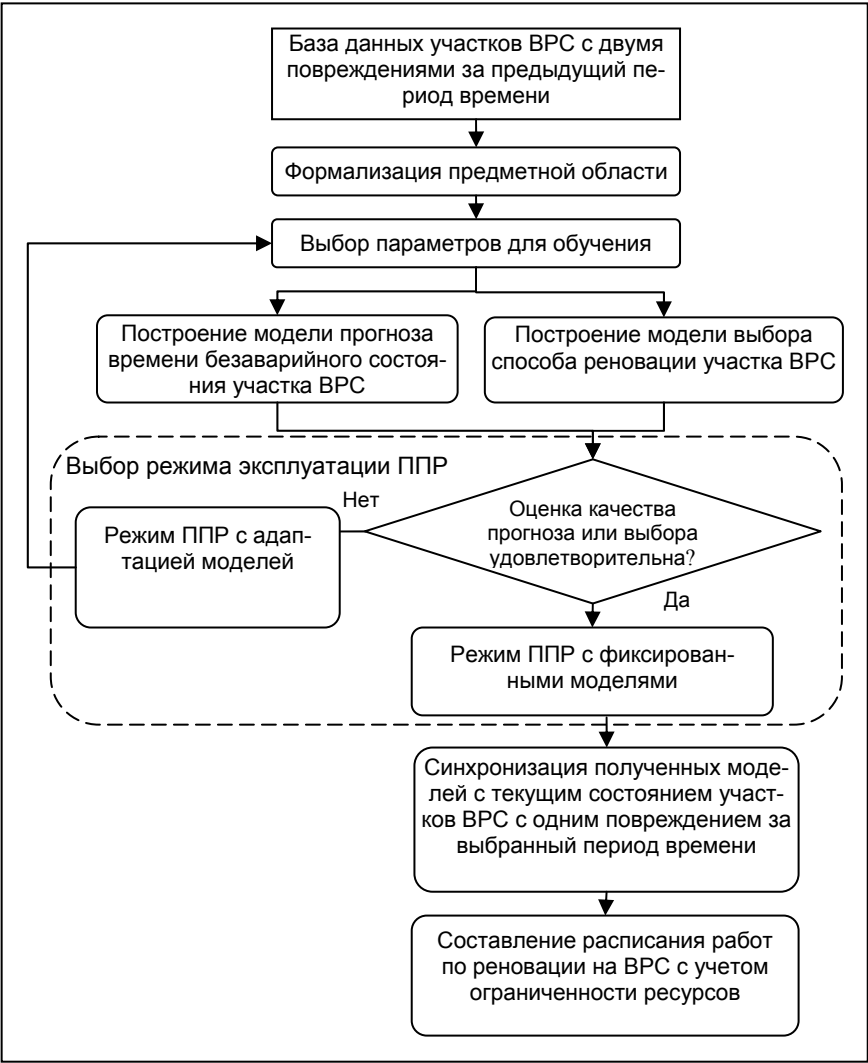


Рис. 3.4 – Структурная схема метода поддержки принятия решений

Целью исследований в рамках данного этапа является определение времени безаварийного состояния участка водораспределительной сети. С формальной точки зрения, данный этап состоит из последовательности задач, которые решаются в процессе выполнения алгоритма метода группового учета аргументов: кодировании и нормализации исходных данных, формировании обучающей и тестовой выборки данных, построении модели и проверки её на адекватность.

Этап 4. Построение модели определения способа реновации на участке трубопровода

В рамках данного этапа решается задача определения рекомендуемого способа проведения работ по реновации на выбранных участках ВРС. Для построения модели выполняется последовательность задач алгоритма МГУА (см.п.4).

Этап 5. Выбор режима эксплуатации системы поддержки принятия решений

В рамках этого этапа определяется стратегия выбора режима эксплуатации системы поддержки принятия решений.

Критерием выбора режима эксплуатации СППР является результаты оценки качества полученных моделей. При положительных оценках качества моделей СППР эксплуатируется в режиме с фиксированными моделями, в противном случае – в режиме управления с адаптацией моделей.

В режиме эксплуатации СППР с адаптацией моделей предусмотрен ввод обновленной информации в обучающую выборку с учетом изменений в исходных данных, корректировки перечня анализируемых технических, статистических параметров и экспертных данных, что позволит учесть динамику изменения состояний рассматриваемых участков ВРС и улучшить качество моделей.

Этап 6. Синхронизация полученных моделей с текущим состоянием участков ВРС с одним повреждением за выбранный период времени

На этапе 3 и 4 построены модели прогноза времени безаварийного состояния участка ВРС и определения способа реновации на участке трубопровода на базах данных, включающих участки ВРС с двумя повреждениями за предыдущий период времени.

В контексте данного этапа происходит вычисление времени безаварийного состояния на участках ВРС с одним повреждением и определения способа проведения работ по реновации на них.

Этап 7. Составление расписания работ по реновации на ВРС с учетом ограниченности ресурсов

Суть данного этапа состоит в составлении и анализе расписаний работ по реновации участков ВРС с учетом оптимального распределения ограниченных ресурсов. На данном этапе последовательно решаются следующие задачи: сортируется перечень участков ВРС в порядке возрастания времени выхода из строя; устанавливается продолжительность работ по определенному способу проведения реновационных работ; определяются ресурсы, необходимые для выполнения работ и их количество. Здесь следует отметить, что лицо, принимающее решение может изменять и дополнять рекомендации по принятию решений, основываясь на знаниях, опыте и неформальных критериях.

Структура метода построена по модульному принципу, согласно которому каждая задача решается самостоятельно. Такой подход позволяет достаточно гибко осуществлять привязку к изменяющимся параметрам, характеризующих состояние участков водораспределительной сети при условии обеспечения информационной увязки между модулями и задачами.

3.3. Разработка алгоритма поддержки принятия решений по управлению работами реновации в режиме эксплуатации с адаптацией моделей самоорганизации

Разрабатываемый метод поддержки принятия решений по управлению работами реновации на ВРС должен способствовать достижению высокого качества управления при отсутствии достаточно полной априорной информации о динамических свойствах ВРС и управляемого процесса. Использование моделей самоорганизации в контуре управления имеет эффект приспособления к изменяющимся условиям за счет того, что функции обработки и анализа недостающей информации об управляемом процессе осуществляются на этапе эксплуатации системы.

Постановка задачи. На основании отрицательного результата оценки качества полученных моделей поддержка принятия решений осуществляется в режиме эксплуатации с адаптацией моделей прогноза выхода из строя участка водораспределительной системы и выбора способа реновации участка ВРС. Исходные данные для решения задач прогноза и выбора различны по содержанию. Для определения будущего состояния объекта используется информация о прошлом и текущем состоянии ВРС, для выбора способа реновации – текущее состояние объекта. Необходимо разработать алгоритмы поддержки принятия решений на основе моделей прогноза и выбора в режиме эксплуатации с адаптацией моделей.

Алгоритм поддержки принятия решений в режиме эксплуатации с адаптацией модели прогноза безаварийного состояния участка ВРС состоит из следующих этапов (рис 3.5):

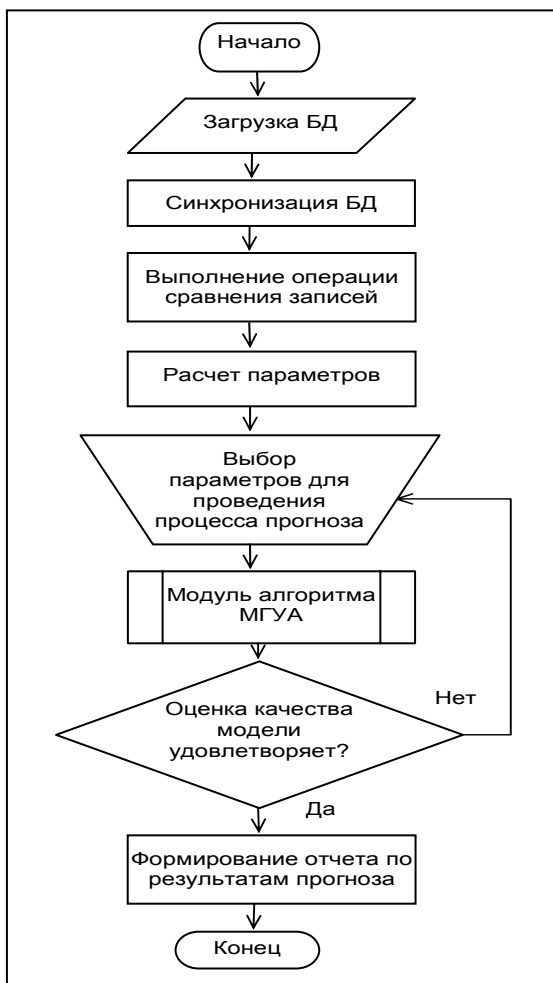


Рис. 3.5 – Алгоритм поддержки принятия решений в режиме эксплуатации с адаптацией модели прогноза безаварийного состояния участка ВРС

Этап 1. Загрузка баз данных. На этом этапе импортируются следующие файлы со статистическими данными: ведомость закрытых нарядов по повреждениям на водораспределительной сети; ведомость нарядов с описанием проведенных аварийно-восстановительных работ.

Этап 2. Синхронизация баз данных. Загруженные БД синхронизируются по общим реквизитам: номер наряда, адрес повреждения, диаметр трубопровода.

Этап 3. Выполнение операции сравнения записей. Из полученной базы данных выбираются идентичные записи тех участков ВРС, где количество повреждений повторяется дважды. Операция сравнения выполняется по ключу «номер наряда».

Этап 4. Расчет параметров. На этом этапе проводится расчет следующих параметров: средний срок выхода из строя участка ВРС, срок ликвидации повреждения, суммарный объем утечки при повреждениях.

Этап 5. Выбор параметров для проведения процесса прогноза. На этом этапе проводится преобразование информации в формализованный вид (кодирование). В результате кодирования базы данных формируется обучающая выборка для построения модели прогноза выхода из строя участка трубопровода. Параметры, не влияющие на результаты обучения, могут не учитываться

Этап 6. Модуль алгоритма МГУА. Обучающая выборка обрабатывается в соответствии с алгоритмом метода группового учета аргументов.

Этап 7. Оценка качества модели. Обучающая выборка обрабатывается в соответствии с алгоритмом МГУА. Если модель, построенная с помощью метода группового учета аргументов, отвечает критериям качества алгоритма, то сгенерированные управляющие решения используются в дальнейшем. В случае,

когда модель признана неадекватной, то поддержка принятия решений происходит в адаптивном режиме. Здесь можно увеличить или уменьшить обучающую выборку, повторяя этапы 5-6.

Этап 8. Формирование отчета по результатам прогноза. В результате работы алгоритма создается отчет с рассчитанными значениями выхода из строя выбранных участков трубопровода. Выходные данные сформированного отчета будут являться входными для построения модели выбора способа реновации участка ВРС.

Рассмотрим алгоритм поддержки принятия решений в режиме эксплуатации с адаптацией модели выбора способа реновации участка ВРС (рис 3.6).

Алгоритм состоит из следующих этапов:

Этап 1. Загрузка баз данных. На этом этапе загружаются следующая информация: данные с результатами прогноза, база данных принятых на баланс предприятия водораспределительных сетей, нормативно-справочные данные с характеристиками исследуемых способов санации и перекладки ВРС.

Этап 2. Синхронизация баз данных. Загруженные БД синхронизируются по общим реквизитам: адрес повреждения, диаметр трубопровода.

Этап 3. Ввод недостающих параметров. В рамках данного этапа при необходимости обеспечивается ручной ввод экспертами недостающей информации в базу данных.

Этап 4. Отбор параметров для проведения процесса выбора. Формируется обучающая выборка для построения модели выбора способа реновации участка водораспределительной сети. А также осуществляется отбор значимых параметров для обучения.

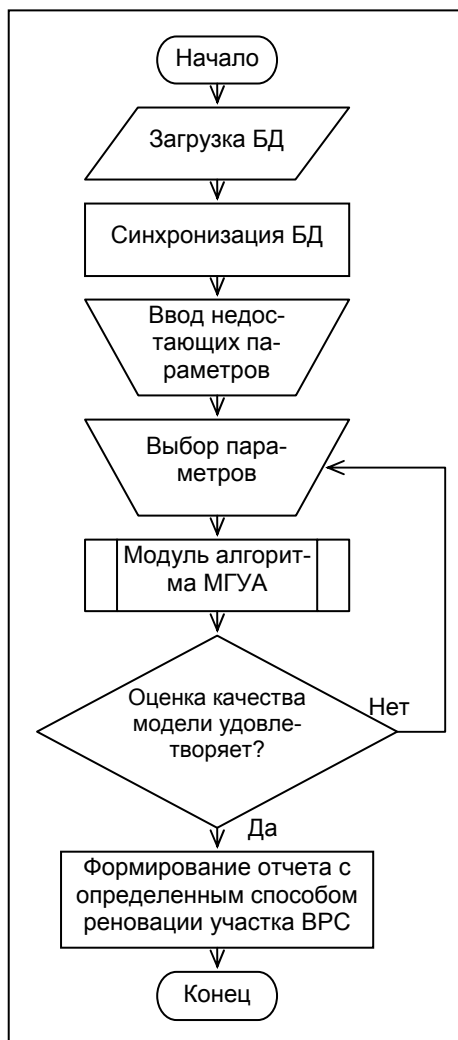


Рис. 3.6 – Алгоритм поддержки принятия решений с адаптацией модели выбора способа по реновации участка ВРС

Этап 5. Модуль алгоритма МГУА. Обучающая выборка обрабатывается в соответствии с алгоритмом метода группового учета аргументов.

Этап 6. Оценка качества модели. По полученным критериям качества модели выбора способа реновации участка ВРС выбирается режим эксплуатации поддержки принятия решений. На этом этапе можно увеличить или уменьшить обучающую выборку, пересмотреть экспертные оценки, переобучить модель, повторяя этапы 4-5.

Этап 7. Формирование отчета с определенным способом реновации на ВРС. В результате положительной оценки качества полученной модели выбора способа реновации участка ВРС к списку участков ВРС, требующих проведения работ по реновации добавляется способ проведения этих работ.

Разработанный алгоритм поддержки принятия решений позволит обеспечить повышение качества управления работами по реновации на ВРС благодаря возможности адаптивной настройки моделей, что позволит оперативно реагировать на возмущения и вырабатывать управляющие воздействия с учетом изменения параметров, характеризующих состояние водораспределительной сети.

3.4. Разработка алгоритма поддержки принятия решений в режиме эксплуатации с фиксированными моделями самоорганизации

При условии статичности исследуемых моделей прогноза, построенных в адаптивном режиме эксплуатации поддержки принятия решений, необходимо использовать найденные закономерности в режиме управления с фиксированными моделями.

Приведем описание алгоритма решения задачи поддержки принятия решений при эксплуатации с фиксированными моделями (рис.3.7).

Этап 1. Загрузка баз данных. Отличие данного этапа от этапов в ранее рассмотренном алгоритме состоит в том, что загружается база данных с одним повреждением, нормативно-справочные данные и база данных ВРС, вновь принятых на баланс предприятия.

Этап 2. Синхронизация данных. Поскольку требуемые технические характеристики, которые нужно поставить в соответствие выбранным поврежденным участкам ВРС находятся в других базах данных необходимо произвести синхронизацию данных по общим реквизитам: номер наряда, адрес повреждения, диаметр трубопровода.

Этап 3. Выбор параметров для проведения процесса прогноза выхода из строя участка ВРС. Формируется обучающая выборка для построения модели прогноза выхода из строя участка трубопровода.

Этап 4. Вычисление прогноза выхода из строя участка трубопровода с помощью фиксированной модели. Вычисление производится по принятой по критерию качества модели в режиме поддержки принятия решений с адаптацией модели.

Этап 5. Отбор параметров для проведения процесса выбора способа проведения работ по реновации на ВРС. На данном этапе выбираются статистические, технические и экспертные параметры, характеризующие способ исследуемых работ реновации на ВРС.

Этап 6. Выбор способа реновации с помощью фиксированной модели. Выбор происходит по фиксированной модели, отвечающей критериям качества.

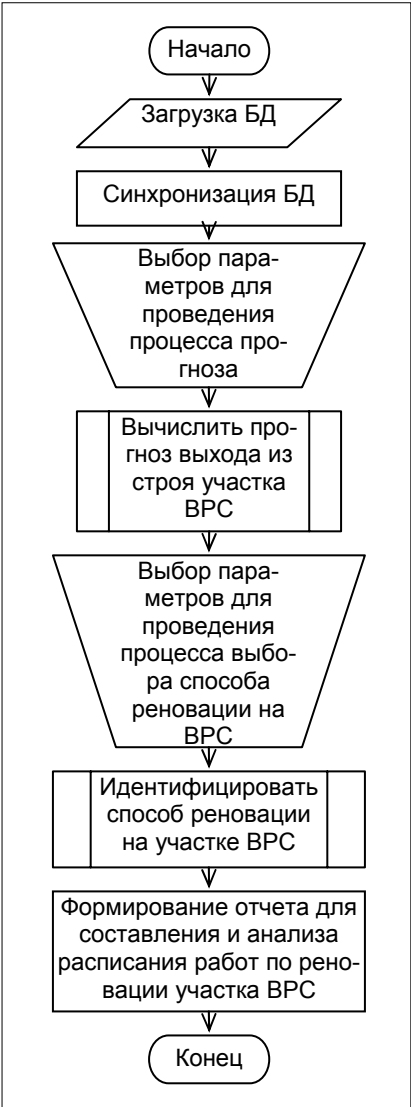


Рис. 3.7 – Алгоритм поддержки принятия решений в режиме эксплуатации с фиксированными моделями

Этап 7. Формирование отчета для поддержки принятия решений. Итоговый отчет представляет собой перечень участков ВРС, где необходимо проведение первоочередных работ по реновации с идентификацией необходимого способа.

В предложенном подходе задача автоматизации экспертных оценок и возможности замены их оценками ЛПР решается за счет использования двух режимов эксплуатации алгоритма поддержки принятия решений. Если режим поддержки принятия решений с фиксированной моделью вырабатывает адекватную модель, которая соответствует выбранным критериям качества, то система может работать в режиме автоматизированной поддержки принятия решений. В противном случае улучшение качества принимаемого решения может быть достигнуто путем дополнения обучающей выборки, изменений экспертных оценок и переобучения модели.

Целью разработки метода является повышение эффективности применения моделей самоорганизации на основе автоматизации экспертных оценок и замены их оценками ЛПР, контролируемой размерности моделей, определения значимых параметров и их влияние на принятие решений по выбору участков ВРС для проведения первоочередных работ по реновации.

Понижение размерности модели осуществляется за счет удаления незначимых параметров, что не снижает её эффективности и адекватности, сокращая при этом эксплуатационные расходы на сбор и обработку информации.

Исследования показали, что различные параметры по разному влияют на результаты прогноза выхода из строя участка трубопровода и принятию решений по планированию и выбору способа проведения работ по реновации участков ВРС [52].

3.5. Разработка алгоритма составления и анализа расписания работ реновации на ВРС

Определено, что в условиях временных и ресурсных ограничений эксплуатация ВРС на современном этапе предполагает планирование работ реновации ВРС с оптимальным распределением ресурсов в целях снижения аварийности. Инструментом для составления и анализа расписания работ выбрана диаграмма Ганта.

Рассмотрим предложенный алгоритм решения задачи составления и анализа расписания работ реновации участков ВРС (рис. 3.8) на основе диаграммы Ганта, состоящий из этапов:

Этап 1. Загрузка базы данных. Загружаемая база данных получена в результате вычислений и состоит из значений времени выхода из строя участков ВРС и рекомендуемого способа реновации.

Этап 2. Сортировка базы данных. Итогом этого этапа является отсортированный список участков трубопровода в порядке возрастания времени безаварийного состояния участков водораспределительной сети.

Этап 3. Вычисление продолжительности выполнения работ. На этом этапе, согласно выбранному способу реновации, для каждого участка трубопровода рассчитывается продолжительность работ, которая определяется по ДБН Д.2.2-22-99.

Этап 4. Выбор параметров для составления расписания. Формируются исходные данные для построения диаграммы Ганта: перечень всех работ, последовательность их выполнения и продолжительность каждой работы.

Этап 5. Модуль построения диаграммы Ганта. От нуля откладываются последовательно участки, у которых время прогноза безаварийной работы соответствует нулевому значению, затем по порядку возрастания откладываются остальные работы.

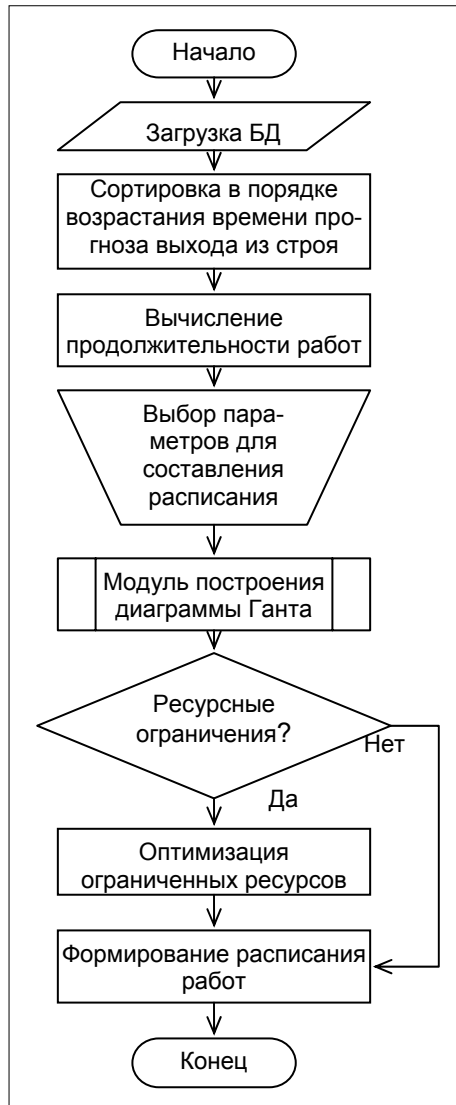


Рис. 3.8 – Алгоритм решения задачи составления и анализа расписания работ реновации участков ВРС

По построенной диаграмме определяется критическое время, критические пути, а также резервы времени всех работ.

Этап 6. Оптимизация времени распределения ограниченных ресурсов. На этом этапе для каждой работы определяется необходимое количество трудовых, материальных и финансовых ресурсов. Согласно доступности ресурсов определяется ограничения, которые оптимизируются с учетом выбранных требований (времени проведения работ, уменьшения стоимости работ).

Этап 7. Формирование расписания работ. Результатом этого этапа является разработанное расписание в соответствии с ресурсным обеспечением работ.

3.6. Разработка метода поддержки принятия решений в задачах управления работами реновации

Установлено [53, 54], что в современных условиях управления предприятием водоснабжения необходимо применение моделей и методов для поддержки принятия решений с использованием информационных технологий. Это объясняется растущими объемами информации, и как следствие, необходимостью объективного сравнения достоинств и недостатков многообразия вариантов потенциальных решений рассматриваемой проблемы с предпочтением оптимального.

Таким образом, необходимо предложить метод, который позволит эффективно решать задачи автоматизированной поддержки принятия решений по управлению работами реновации на водораспределительной сети на основе их моделирования.

Перечислим принципы, которым должен удовлетворять разрабатываемый метод поддержки принятия решений:

Принцип иерархичности. Согласно этому принципу разработка и принятие решений осуществляется в такой последовательности, где последующее решение вытекает из предыдущего.

Принцип формализованности. Получаемые на каждом этапе метода решения, должны иметь четкий, формализованный, окончательный вид для последующего анализа.

Принцип соподчиненности. Выбор и принятие решений должны отражать задачи тех уровней управления, на которые возложено их выполнение и реализация.

Процесс принятия решений является промежуточным этапом между формулировкой задач, требующих решения и их реализации. После решения поставленных задач проводится оценка результата, полученного от выполнения решения.

Рассмотрим общую структуру метода автоматизированной поддержки принятия решений по управлению работами реновации участков на водораспределительной сети (рис. 3.9).

Согласно структуре метода поддержки принятия решения, исходной информацией для принятия решения по управлению работами реновации на участках ВРС являются данные, полученные в результате решения следующих задач:

1. Построение прогноза выхода из строя участка водораспределительной сети.
2. Выбор способа реновации для выбранных участков ВРС.
3. Составление и анализ расписаний работ по реновации водораспределительной сети.

В результате решения первой задачи формируется отчет, в состав которого входят технические и статистические параметры участков ВРС, результаты прогнозов. На основании полученных данных проводятся исследования статистики выхода из строя участка ВРС, выявление значимых параметров, влияющих на их аварийность (технические, организационные, сезонные, влияние внешней среды и другие). По результатам решения этой задачи проводится принятие следующих оценок:



Рис. 3.9 – Структура метода поддержки принятия решений

1. *Оценка готовности водораспределительной сети для выполнения функций транспортирования целевого продукта с требуемым давлением и качеством.* В рамках этого решения определяется стратегия планирования необходимых работ реновации. Непосредственно на этом этапе определяется соотношение протяженности аварийных ВРС к их общей протяженности, анализируется преобладающая причина повреждений, например, свищи – влияние внутренней и внешней коррозии, переломы, трещины – влияние сдвигов слоев почвы и т.д., оцениваются потери воды и связанные с этим расходы на её очистку и затраты электроэнергии.

2. *Оценка равномерности изменения протяженности аварийных участков ВРС.* Суть этого решения сводится к оценке количественного распределения протяженности аварийных компонент ВРС относительно каждого района города, диаметра трубопровода и пр. для анализа возможных причин, влияющих на аварийность.

3. *Анализ количества компонент, требующих сохранения работоспособности.* Целью данного решения является составление стратегического плана проведения работ реновации с требуемыми параметрами для последующего анализа каждого поврежденного участка.

4. *Определение приоритетности выполнения работ согласно выбранному критерию – сроку выхода из строя участка ВРС.* В связи с ограничением финансовых, материальных и трудовых ресурсов предприятий невозможно выполнить все необходимые работы по реновации поврежденных участков ВРС. Поэтому, согласно выбранному критерию, выбираются те поврежденные участки, выход из строя которых имеет минимальный срок.

Целью решения второй задачи является дополнение отчета, полученного при решении первой задачи экономическими показателями, на основе чего происходит:

1. *Оценка финансовых, материальных потребностей для проведения работ реновации на участках ВРС.* Суть данного решения состоит в формировании отчета для планово-экономических расчетов, согласно которым проводится анализ экономии от сокращения потерь воды, затрат электроэнергии и ликвидацию повреждения, рассчитываются сроки окупаемости работ реновации.

2. *Оценка объемов работ на обновление и модернизацию существующих компонент ВРС (перекладка).* В результате данного решения определяется общее количество участков ВРС, требующих перекладки для реализации решений соответствующими структурными подразделениями предприятия (отдел материально-технического снабжения, строительные бригады).

3. *Оценка объемов работ на восстановление (санация).* В рамках этого решения выясняется количество участков ВРС для проведения работ по санации. А также определяется способ проведения работ санации по каждому рассматриваемому участку ВРС.

В результате решения задач прогноза и выбора определяют стратегически важные показатели, которые участвуют на этапе планирования работ по реновации участков ВРС.

Решением третьей задачи является расписание работ реновации ВРС, на основе которого принимаются следующие оценки:

1. *Оценка общей длительности работ с учетом технологии производства и нормативов.* В результате этого решения оптимизируется и уменьшается общая длительность работ за счет организации параллельного их выполнения, сокращения времени

выполнения некоторых работ, устранения временных разрывов между работами.

2. *Оценка объемов ресурсов, необходимых для выполнения работ.* Суть данного решения состоит в определении перечня, количества и доступности необходимых ресурсов для выполнения работ в каждый момент времени.

3. *Анализ обеспеченности работ ресурсами.* В результате выбора всех участков трубопроводной сети, требующих работ реновации рассчитывается общая стоимость работ и анализируется их обеспеченность финансовыми ресурсами.

4. *Принятие плана работ по реновации участков ВРС.* Итогом этого решения является документ, который содержит согласованный план проведения работ с учетом рассмотренных ограничений в удобном представлении для рассмотрения.

Следует отметить, что результаты решения вышеперечисленных задач могут использоваться как отдельные блоки, охватывая деятельность структурных подразделений, отвечающих за реализацию того или иного решения, необходимого для достижения цели управления в рамках заданного периода времени.

РАЗДЕЛ 4

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЗДАНИЯ, ВНЕДРЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ПО РЕНОВАЦИИ ВОДОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

В предыдущем разделе предложен метод использования моделей самоорганизации для поддержки принятия решений по управлению работами реновации на водораспределительной сети. В представленном разделе проводится интеграция разработанных моделей самоорганизации в экспертную систему для поддержки принятия решений по управлению работами реновации на водораспределительной сети. Проводится оценка эффективности предлагаемой экспертной системы для практического применения предприятиями водоснабжения.

4.1. Экспертная система как инструмент для обработки данных

Использование экспертной системы в целях систематизации и формализации информации в исследуемой предметной области обусловлен следующими причинами:

возможностью автоматизации рутинной работы эксперта (пользователя);

необходимостью улучшения качества решений прикладных задач, требующих знаний экспертов;

возможностью решения неформализованных и частично формализованных задач;

необходимостью органического сочетания количественных данных и качественной информации, которая на содержательном уровне отражает технологические процессы и понятна пользователю.

Неформальные знания эксперта, которые используются при выборе участков трубопровода для проведения реновационных работ и выбора способа проведения этих работ, необходимо формализовать с помощью соответствующей базы знаний. Кроме знания основных фактов и данных эксперт использует логику рассуждений, которая также должна быть отражена в экспертной системе. Формализация этих знаний, в отличие от математических методов и традиционного программирования, требует применения эвристических правил.

Рассмотрим состав знаний, какими должна обладать ЭС для выполнения поставленных в монографии задач.

Прежде всего, состав знаний зависит от исследуемой предметной области.

Знания, как и данные, характеризуют совокупность исследуемых участков водораспределительной сети, и их характеристики обладают следующими свойствами:

неточности в силу их экспертного характера;

приблизительности и многозначности, так как рассматриваются все возможные пространства для выбора решения.

Рассматриваемая предметная область является динамической, поскольку представления данных и знаний учитывают изменения объектов и их свойств во времени. При этом причины, вызвавшие эти изменения, как правило, имеют неизвестную природу и не поддаются учёту или прогнозу.

Таким образом, состав знаний определяет решаемые задачи как неформализованные, что затрудняет процесс извлечения новых знаний.

Для упрощения процесса получения знаний от эксперта и передачи их в экспертную систему процесс приобретения знаний осуществляется посредством стандартных схем-образцов.

В общем виде, для решения задач прогноза выхода из строя участка водораспределительной сети и определения способа проведения работ реновации, экспертом вводится следующая информация:

- схема-образец, описывающая выход из строя участка трубопровода с известным набором параметров;

- схема-образец, описывающих рассматриваемые способы проведения работ реновации;

- словарь терминов для каждого параметра.

Специально подобранные схемы сущностей исследуемой предметной области поступают на специальный модуль, который представлен алгоритмом метода группового учета аргументов и является программой приобретения знаний (рис. 4.1).

База знаний состоит из правил, выраженных во внутреннем представлении программы приобретения знаний. Формирование понятий происходит на основании правил базы знаний, которые являются основой процесса приобретения новых правил.

Таким образом, процесс приобретения знаний в ЭС имеет обратную связь. Полученные модели решения задач являются основой приобретения новых правил. При добавлении новых правил в базу знаний выполняется вычисление новых моделей решения задач.

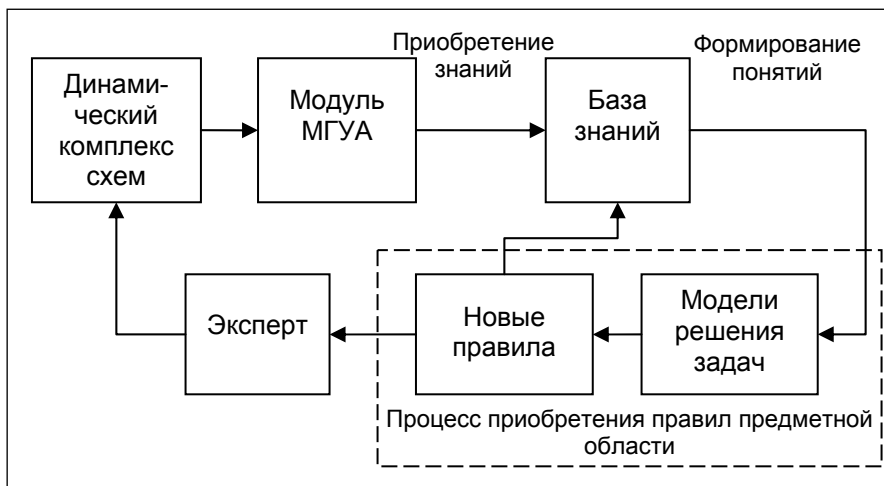


Рис.4.1 – Схема приобретения знаний в ЭС

Классифицируем разработанную ЭС по типу приложения, стадии существования и типу проблемной среды.

По типу приложения экспертная система для реновации водораспределительной сети является:

интегрированной, поскольку взаимодействует в ходе работы с другими программными системами (электронные таблицы, базы данных);

независимой, так как может быть установлена на другие программно-аппаратные платформы без перепрограммирования;

децентрализованной, поскольку предполагает использование на базе распределенных ЭВМ с архитектурой клиент-сервер.

По стадии существования, которая характеризует степень отлаженности, разработанная ЭС относится к коммерческим сис-

темам. Она полностью подготовлена к продаже заинтересованным потребителям.

По типу проблемной среды, разработанная ЭС относится к динамической системе. Это объясняется структурой данных, которая состоит из описаний сущностей в виде объектов и их экземпляров, состав которых меняется.

Типовая структура экспертной системы содержит в качестве основных компонент базу знаний и механизм логического вывода, в качестве дополнительных – подсистему общения и подсистему объяснения.

Механизм логического вывода состоит из программного модуля, реализующего алгоритм метода группового учета аргументов. Именно он позволяет решать задачи моделирования процесса поиска решения на исходных знаниях с целью получения новых знаний.

Дополнительные подсистемы обеспечивают общение с пользователем, перенос знаний от эксперта в компьютерную программу, объяснение и обоснование результатов вывода.

Подсистема общения обеспечивает:

диалоговый режим ввода исходных данных;

формирование словаря параметров, формализация которых осуществляется путем присвоения каждому параметру значения из диапазона изменения параметра;

возможность вносить в базу знаний дополнительную информацию или удалять ненужную.

Кроме того, подсистема общения обеспечивает связь между конечным пользователем с подсистемой объяснения или механизмом логического вывода.

В подсистеме объяснений решается задача обратная задаче формализации параметров. По значениям полученных моделей,

построенных механизмом логического вывода, определяются время безаварийной работы участка трубопровода и способ проведения работ по реновации.

Таким образом, система объяснений позволяет автоматически строить процесс пояснения. При этом используется информация, которая хранится в базе знаний.

Традиционные методы построения систем управления и поддержки принятия решений при эксплуатации ВРС предусматривают использование автоматизированных или автоматических систем. При этом методы принятия решений, как правило, опираются на строгие алгоритмы. Задачи, решаемые в монографии, не могут быть подвергнуты четкому математическому анализу и не имеют алгоритмического решения, поскольку процесс их решения основывается на меняющихся исходных данных.

Экспертная система позволяет автоматизировать процесс принятия решения по реновации ВРС с последующей проверкой правильности полученного решения.

4.2. Структура и функции экспертной системы по реновации водораспределительной сети

Для решения задач прогноза выхода из строя участка водораспределительной сети, выбора способа реновации и алгоритма составления оптимального расписания работ разработана экспертная система. Экспертная система реализована в виде комплекса программ, написанных в среде программирования Delphi 7 и представляющих интегрированную среду разработки (Integrated Development Environment, IDE).

Программный продукт включает следующие модули, реализующие алгоритмы:

импорта и синхронизации данных;

выбора наилучшей модели из множества моделей Колмогорова-Габбора;

построение расписания работ с учетом оптимального распределения ограниченных ресурсов.

Все данные о водораспределительной системе хранятся в базе данных Data.mdb. Приложение обеспечивает логическое соединение программных модулей с наборами данных и выбор информации из наборов данных, заключенных в хранилище ADO (ActiveX Data Object). В качестве протокола, определяющего принципы взаимодействия приложения с базами данных, используется 32-разрядные драйверы ODBC (Open Database Connectivity). Все имеющаяся информация о водораспределительной сети, хранящаяся в этой базе данных, отображается в таблицах, представленных в окнах приложения. Далее приведены экранные формы разработанной экспертной системы (рис. 4.1).

Экспертная система предназначена для моделирования и управления техническим состоянием водораспределительной сети в режиме реального времени и включает следующие три подсистемы:

1. Работа с базами данных.
2. Экспертная оценка.
3. Отчеты.

Первая подсистема обеспечивает импорт и синхронизацию данных, выполнение вычислительных операций над параметрами, возможность редактирования данных.

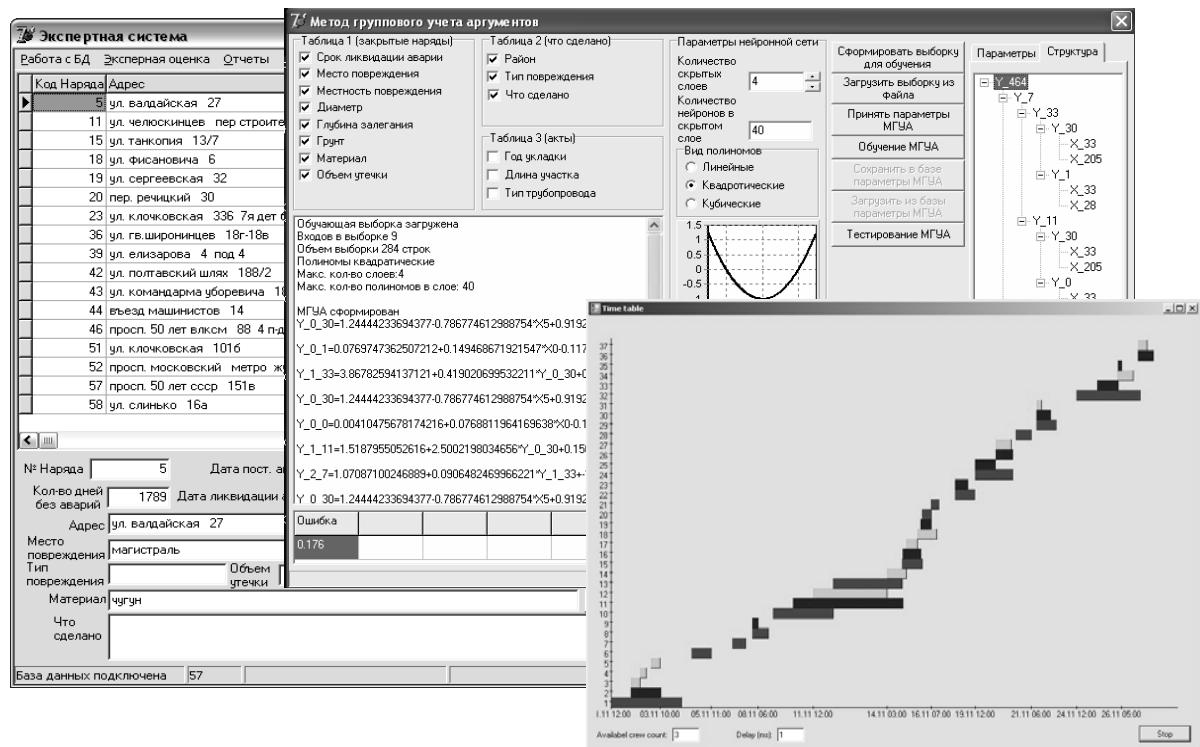


Рис. 4.1 – Интерфейс экспертной системы

Вторая подсистема позволяет выбрать на основе экспертной оценки набор параметров, существенно влияющих на объект управления. Подсистема содержит модуль, реализующий алгоритм метода группового учета аргументов, с помощью которого проводится моделирование задач прогноза выхода из строя участка водораспределительной сети и выбора рекомендуемого способа реновации. Подсистема также содержит модуль алгоритма построения расписания работ.

Третья подсистема предназначена для выбора набора параметров, необходимых при составлении отчетов, являющихся информационной базой для поддержки принятия решений.

Рассмотрим основные особенности предлагаемой экспертной системы [55]:

1. *По своему масштабу* разработанная экспертная система относится к однопользовательским системам, т. е. предназначенным для использования на одном рабочем месте. В основе системы лежит стандарт X-Base , который позволяет на основе высокоуровневой инструментальной среды проектировать базы данных, пользовательский интерфейс, структуру обработки данных, отчеты.

2. *По характеру использования информации* система относится к управляющей, основной задачей которой является автоматизированная поддержка принятия решений. Итогом работы системы является модификация информации.

3. *Согласно классификации по поддерживаемым стандартам и технологиям управления* экспертная система относится к оперативному анализу данных – OLAP (Online Analytical Processing) с технологией поддержки принятия управленческих решений на основе концепции многомерных кубов информации.

4. *По степени автоматизации* система предполагает участие в процессе обработки информации технических средств (компьютера) и человека.

Информационная модель предлагаемой программы имеет вид, представленный на рис. 4.2.

Рассмотрим более детально некоторые из функциональных блоков приведенной модели:

1. *Импорт данных.* В рамках этого блока решается задача импорта данных из форматов, которые поддерживаются в виде отчетов других приложений, задействованных при управлении состоянием участков ВРС. В их состав входят оперативные базы данных: о повреждениях на водораспределительной сети, информация о характере проводимых при этом аварийно-восстановительных работ и нормативно-справочные базы данных рассматриваемых способов реновации трубопровода;

2. *Формирование и идентификация моделей прогноза и выбора методом группового учета аргументов.* Указанный модуль реализует алгоритм выбора наилучшей модели из множества моделей Колмогорова-Габбора второго и первого порядка, при этом идентификация модели осуществляется по методу наименьших квадратов;

3. *Формирование расписания работ реновации участков ВРС для поддержки принятия решений по реновации участков ВРС.* В модуле происходит формирование рекомендаций для поддержки принятия решений на основе итогового отчета с перечнем участков водораспределительной сети, требующих первоочередных мер для проведения работ реновации с выбором рекомендуемого способа. Затем составляется расписание проведения работ с учетом ограниченности финансовых, материальных и трудовых ресурсов.

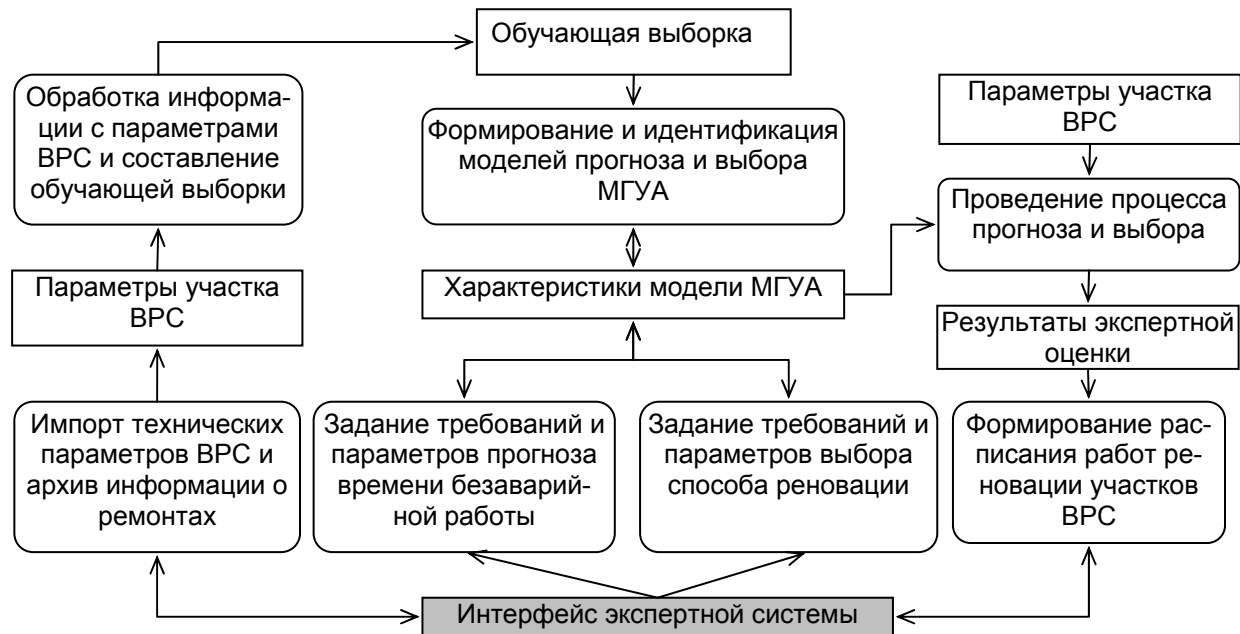


Рис. 4.2 – Информационная модель программного продукта

На рис. 4.3 представлено дерево задач, решаемых в процессе реализации метода принятия решений при управлении работами реновации на ВРС.

Таким образом, разработанная экспертная система реализует последовательность этапов предложенного метода на основе разработанных моделей, построенных с помощью МГУА, а также алгоритма построения расписания работ с учетом оптимального распределения ограниченных ресурсов. Результаты каждого этапа представляются в табличной и графической форме для лучшей интерпретации полученных результатов.

4.3. Оценка количественных показателей эффективности внедрения и эксплуатации экспертной системы

Для обоснования целесообразности использования экспертной системы необходимо провести оценку экономической эффективности её внедрения и эксплуатации в производственном процессе предприятий водоснабжения.

Определение экономической эффективности внедрения и эксплуатации разработанной ЭС осуществляется по следующим направлениям:

1. Сравнение существующей системы обработки данных и предлагаемой относительно объема решаемых задач и эффективности способов организации технологического процесса обработки и выдачи информации.

2. Оценка экономической эффективности эксплуатации разработанной экспертной системы в количественном и качественном выражении.

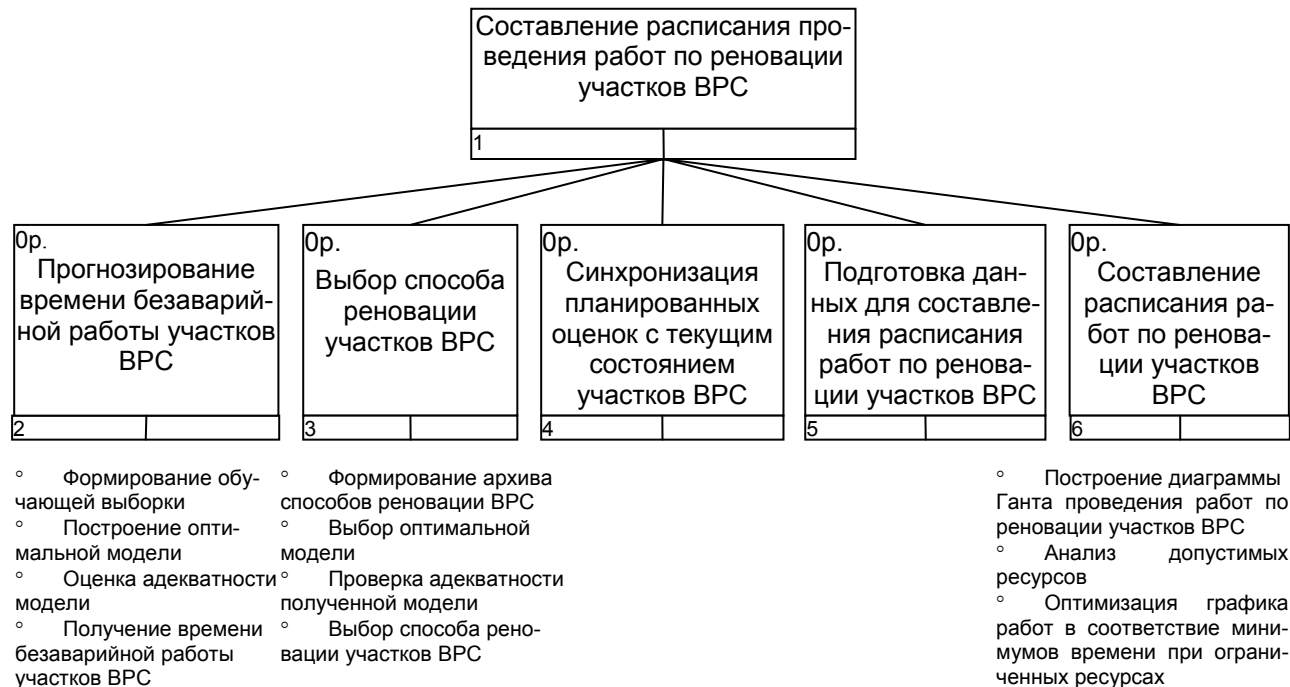


Рис. 4.3 – Дерево задач управления работами реновации на участках ВРС

В результате исследований [56] показано, что разработанная ЭС, основанная на обработки информации с помощью метода группового учета аргументов, в отличие от существующих систем обработки данных имеет возможность гибкой постановки задач, большую информационную емкость и не нуждается в перепрограммировании при изменении набора параметров.

Проведем оценку экономической эффективности эксплуатации разработанной ЭС с целью поддержки принятия решений по реновации участков водораспределительной сети в количественном и качественном выражении.

Для определения экономической эффективности в количественном выражении необходимо провести оценку затрат на разработку, внедрение, эксплуатацию ЭС и планируемой экономии. Поскольку экспертная система разработана в рамках представленного исследования, то затраты на её разработку рассматриваться и учитываться при анализе эффективности системы в целом не будут. Затраты, необходимые для внедрения экспертной системы носят единовременный характер и состоят из затрат:

- на приобретение вычислительной техники;
- связанных с обучением пользователей, тестированием системы, консультации пользователей в ходе эксплуатации;
- связанных с разработкой новых моделей, включающих рабочее время сотрудника.

Затраты при эксплуатации состоят из затрат:

- рабочего времени на проверку и архивирование данных;
- связанных с обслуживанием и эксплуатацией технических средств.

При условии, что технические средства имеются в наличии в требуемом количестве и качестве, то затраты на внедрение и

эксплуатацию разработанной ЭС могут быть сведены к минимуму.

Определим основные факторы экономии, которая может быть получена в результате эксплуатации ЭС [57]:

1. *Сокращение потерь и непроизводительных расходов воды.* Экономия воды достигается в основном за счет сокращения аварийных участков трубопровода, реновационные работы на которых произведены до выхода их из строя, снижение расходов при спуске, дезинфекции и промывке, на сброс воды при пуске артезианских скважин.

2. *Сокращение расхода электроэнергии.* Экономия вследствие снижения избыточных напоров на выходе насосных станций, необходимого для подачи воды потребителю.

3. *Сокращение объема химических реагентов на подготовку воды.* Экономия достигается за счет сокращения утечек и неучтенной воды.

4. *Уменьшение средств на аварийно-восстановительные работы.* Вследствие предупреждения повреждений на водораспределительной сети сократятся финансовые и материальные затраты на последующие работы реновации.

5. *Сокращение численности ИТР,* по причине создания автоматизированного управления работами по реновации на участках ВРС.

Анализ затрат при эксплуатации экспертной системы показывает, что наиболее существенной составляющей общей экономии является сокращение потерь и непроизводительных расходов воды.

4.4. Расчет экономического эффекта за счет снижения непроизводительных расходов воды

Поскольку предлагаемая экспертная система позволяет выявлять и предупреждать аварийные ситуации на водораспределительной сети, то можно утверждать, что её использование направлено на снижение потерь и непроизводительных расходов воды. В структуре затрат (рис.4.5) предприятия водоснабжения г. Харькова наибольший удельный вес занимают материальные затраты, которые на 50,7% состоят из затрат на электроэнергию и материалы для подготовки воды (хлор, коагулянт, флокулянт, магнофлук и др.).

Кроме того, динамика изменений непроизводительных потерь воды за последние 5 лет (табл. 4.1), имеющая тенденцию к увеличению, подтверждает необходимость внедрения ЭС.

Рассмотрим сокращение затрат предприятия за счет экономии по следующим статьям затрат:

1. *Электроэнергия.* По данным предприятия водоснабжения г. Харькова по фактическим потерям воды за год, в среднем 1% непроизводительных потерь воды составляет 1000 *тыс. м³*. Расход электроэнергии на 1% в *тыс. кВт.ч./год*:

$$P_{э/э} = P_{ср} \times P_{уд} = 1000 \times 4,3813 = 4381,3 \text{ тыс. кВт.ч./год},$$

где $P_{ср}$ – средний годовой расход электроэнергии, *тыс. м³*;

$P_{уд}$ – удельный расход электроэнергии на подъем 1 *м³* воды, *кВт.ч./м³*.

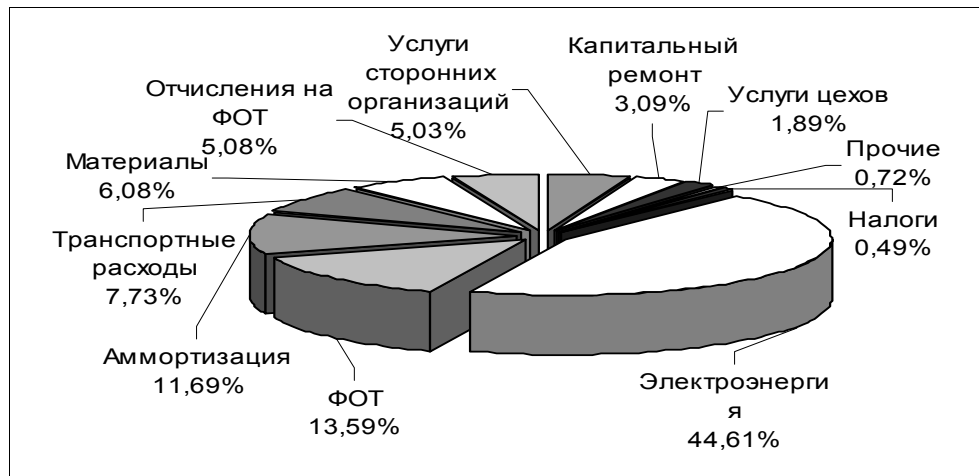


Рис. 4.5 – Структура по прямым производственным затратам КП ПТП «Вода» г. Харькова за 2006 г.

Таблица 4.1
Динамика изменений непроизводительных потерь воды по городу

Показатель	Года				Абсолютное отклонение		
	2004	2005	2006	2007	2005 / 2004	2006 / 2005	2007 / 2006
% утечки и неучтенной воды	31,354	31,675	32,641	32,997	0,321	0,966	0,356

Сокращение расходов электроэнергии при экономии непроизводительных потерь на 1% составит:

$$\mathcal{E}_\varepsilon = P_{\varepsilon/\varepsilon} \times T_{cp} = 4381,3 \times 0,34258 = 1500,9 \text{ тыс. грн.},$$

где $T_{cp} = 34,258$ – средний тариф 1 кВт. ч. за октябрь 2007 г., коп.

2. *Материалы для подготовки воды.* Необходимое количество материалов для обработки поднятой воды рассчитываются по формуле:

$$P_m = \frac{P_{общ}}{П_{воды}} = \frac{2890,7}{185060,3} = 0,0156 \text{ тыс. грн./м}^3,$$

где $P_{общ}$ – годовая сумма расходов на материалы для подготовки воды, тыс. грн.; $П_{воды}$ – годовой подъем воды, тыс. м³.

Расход материалов на 1м³ поднятой воды по данным предприятия водоснабжения г. Харькова составляет:

$$P_m = \frac{2890,7}{185060,3} = 0,0156 \text{ тыс. грн./м}^3.$$

Экономия материалов при сокращении непроизводительных потерь воды на 1%:

$$\mathcal{E}_m = P_{cp} \times P_m = 1000 \times 0,0156 = 15,62 \text{ тыс. грн.},$$

где P_{cp} – среднее количество непроизводительных потерь воды в год; P_m – расход материалов на 1 м³ поднятой воды, грн./м³.

3. *Расчет экономического эффекта за счет сокращения ИТР.* С учетом большого объема информации, требующей обработки для определения участков ВРС, требующих первоочередных мер для проведения работ по реновации, внедрение разработанной ЭС позволит сократить одного инженерно-технического работника. Это даст возможность сократить затраты на оплату труда и социальные отчисления.

Расход заработной платы в год составит:

$$\mathcal{E}_3 = 12 \times \mathcal{Z}_{cp} \times \mathcal{Z}_{np} \times K_{umr} = 12 \times 1452 \times 1,2 \times 1 = 209088 \text{ грн},$$

где \mathcal{Z}_{cp} – среднегодовая основная заработная плата одного ИТР, грн.; \mathcal{Z}_{np} – премиальные вознаграждения, %.; K_{umr} – сокращаемое количество ИТР, чел.

Расходы на социальные отчисления:

$$P_{co} = \mathcal{E}_3 \times P_{omch} = 20908,80 \times 38 = 7945,34 \text{ грн.},$$

где $P_{omch} = 38$ – процент отчислений на социальное страхование от годового фонда оплаты труда, %.

Таким образом, сокращение фонда оплаты труда составит 28854,14 грн./год.

4. *Экономия за счет снижения затрат на ликвидацию повреждений.* Предупреждая повреждение на ВРС с помощью разработанной экспертной системы имеется возможность сократить затраты на её ликвидацию.

По статистическим данным предприятия водоснабжения г. Харькова общее количество повреждений в 2006 году составило 4075 шт., из них 26,2% происходит на трубопроводе диаметром 100 мм.

Рассчитаем среднюю стоимость ликвидации одного повреждения на трубопроводе диаметром 100 мм:

$$C_{cp} = K_{повр} \times C_{ликв} = 1069 \times 3,469 = 3708,361 \text{ тыс. грн.}$$

где $K_{повр}$ – количество повреждений в год, шт.; $C_{ликв}$ – стоимость ликвидации одного повреждения на трубопроводе диаметром 100 мм, тыс. грн.

Таким образом, экономия затрат при сокращении повреждений на трубопроводе с наибольшим количеством повреждений составит 3708,361 тыс. грн./год.

В целом, эксплуатация экспертной системы по реновации водораспределительной сети позволит сократить затраты электроэнергии и материалов при подготовке воды на 1% непроизводительных потерь воды. Экономия составит 1516,52 тыс. грн.

Количественные оценки эффективности внедрения экспертной системы сведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2
Оценки показателей эффективности внедрения ЭС

Факторы экономии	Экономия в год, тыс. грн.
Сокращение расхода электроэнергии	1500,9
Сокращение материальных затрат на подготовку воды	15,62
Уменьшение средств на аварийно-восстановительные работы	3708,361
Сокращение численности ИТР	28,854
ИТОГО	5253,735

4.5. Оценка качественных показателей эффективности разработанной экспертной системы

Определено, что растущие объемы информации, меняющиеся критерии выбора данных, рост повреждений на водораспределительной сети, ведущих к непроизводительным затратам предприятий водоснабжения требуют использования информационных технологий для повышения экономической эффективности управления работами по реновации.

Проведем анализ эффективности внедрения экспертной системы по следующим качественным показателям

1. *Мониторинг статей затрат.* При составлении плана работ по реновации водораспределительной сети в контуре экспертной системы ведется учет запланированных затрат и их действительных отклонений для проведения конкретной работы. Проведение такого контроля затрат помогает проводить мониторинг по их сокращению, определять работы, где возникают отклонения плановых затрат от фактических, отслеживая таким образом возникновение накладных расходов, обеспечивает руководителя оперативной информацией для анализа затрат для конкретной работы. Предположительный экономический эффект мониторинга статей затрат при эксплуатации ЭС составит 5% от общего объема затрат.

2. *Экономия рабочего времени при согласовании и принятии решений.* ЭС предоставляет оперативную, обоснованную информацию для принятия безошибочных решений за счет автоматизированной процедуры поддержки принятия решений в определении приоритетных участков водораспределительной сети для проведения ремонтно-восстановительных работ, выбора способа реновации, составления расписания работ с учетом ограниченности ресурсов. При этом контролируется риск, который при незначительных сокращениях в финансировании отдельных работ (или при ограничении материальных, трудовых ресурсов)

приводит к существенному увеличению сроков всего проекта, обесцениванию отдельных работ. Экономический эффект при использовании ЭС примерно 10% от объема перерабатываемой информации.

3. *Экономия при закупке материалов на проведение работ.* Разработанная экспертная система позволяет точно рассчитать потребность в ресурсе на каждый период времени в соответствии с принятым планом производства работ. Этот расчет исключает недостаточность производственных запасов, который влечет к необходимости срочных закупок с дополнительными финансовыми затратами и избыточность закупок, которая способствует увеличению инвестиций в складские запасы, тем самым «замораживая» средства предприятия. Экономический эффект при закупке материалов на проведение работ составит около 5% от объема закупок всех материалов.

Таким образом, разработанная экспертная система обработки информации для поддержки принятия решений по реновации водораспределительной сети позволит, с достаточно высокой экономической эффективностью, проводить оценку и мониторинг состояния водораспределительной сети, оптимизировать процесс распределения ограниченных ресурсов, снижая затраты по основным статьям расхода предприятия.

Послесловие

В результате исследований решена новая научная задача разработки экспертной системы обработки информации с применением метода группового учета аргументов для поддержки принятия решений по реновации водораспределительной сети.

Проведенный анализ состояния и особенностей управления системой водоснабжения на современном этапе показал целесообразность использования информационных технологий для объективной оценки состояния водораспределительной сети и принятия эффективных оперативных и стратегических решений в целях сохранения целостности инженерных сетей, снижения ресурсо- и энергопотребления, обеспечение экологической безопасности окружающей среды.

Предложенная модель, предназначенная для вычисления среднемесячного срока безаварийного состояния участка водораспределительной сети, позволяет идентифицировать состояние участков водораспределительной сети и определять приоритетность работ по реновации. Модель, идентифицирующая способ реконструкции участка водораспределительной сети, позволяет автоматизировать процесс управления водораспределительными сетями на этапе принятия решений в ситуации определения вида работ реновации, не снижая качества управления.

В практической деятельности предприятий водоснабжения использование разработанных моделей самоорганизации способствует оперативному учету динамических изменений характеристик водораспределительной сети, сокращению сроков разработки новых систем для автоматизации процесса поддержки принятия решений, обеспечению эффективности работы системы водоснабжения в целом.

Интегрированные в экспертную систему модели и метод поддержки принятия решений оценки, планирования и организации работ по реновации участков водораспределительной сети позволяют оперативно следить за состоянием водораспределительных сетей, своевременно ликвидировать неудовлетворяющие эксплуатационным характеристикам аварийно-опасные участки рекомендуемым способом реновации и составлять расписание работ с учетом оптимального распределения ограниченных ресурсов.

Таким образом, развитие и внедрение информационных технологий – самый действенный и неизбежный способ повышения качества управления и эффективности функционирования предприятий водоснабжения.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

авария – выход из строя, повреждение какого-либо механизма, машины и т.п. во время работы, движения [58, с.11]

вероятностная бумага нормальная – специальным образом разграфленная бумага, построенная так, что график функции нормально-го распределения изображается на ней прямой линией [59, т.1, с.665]

водопроводная сеть – совокупность водопроводных линий (трубопроводов) для подачи воды к местам потребления; один из основных элементов системы водоснабжения [58, с.235]

износ – изменение размеров, формы, массы технического объекта или состояния его поверхности вследствие остаточной деформации от постоянно действующих нагрузок либо из-за разрушения поверхностного слоя при трении [58, с.484]

моделирование – исследование каких-либо явлений, процессов или систем объектов путем построения и изучения их моделей; использование моделей для определения или уточнения характеристик и рационализации способов построения вновь конструируемых объектов [58, с.828]

модель – интерпретация формального языка [59, т.3, с.769]

наименьших квадратов метод – один из методов ошибок теории для оценки неизвестных величин по результатам измерений, содержащим случайные ошибки [59, т.3, с.876]

нормальное распределение – одно из важнейших распределений вероятностей непрерывных случайных величин [59, т.3, с.1065]

регрессионный анализ – раздел математической статистики, объединяющий практические методы исследования регрессионной зависимости между величинами по статистическим данным [59, т.4, с.926]

регрессия – зависимость среднего значения какой-либо случайной величины от некоторой другой величины или от нескольких величин [59, т.4, с.927]

ремонт – исправление повреждений, замена элементов, починка. Различают текущий ремонт (замена или восстановление сменных деталей), средний (частичная разборка устройства и его восстановление), капитальный (полная разборка устройства с заменой всех изношенных деталей) [58, с.1130]

реновация – экономический процесс замещения выбывающих в результате морального и физического износа производственных основных фондов новыми – необходимое условие простого воспроизводства [58, с.1131]

экономическая эффективность – результативность производства, соотношение между результатами хозяйственной деятельности затратами труда [58, с.1550]

экспертная система – это компьютерная программа, которая содержит знания и аналитические способности одного или нескольких экспертов по отношению к некоторой области применения. Также определяется как система, которая использует базу знаний для решения задач (выдачи рекомендаций) в некоторой предметной области [<http://uk.wikipedia.org/>]

ADO (от англ. ActiveX Data Objects – «объекты данных ActiveX») – интерфейс программирования приложений для доступа к данным, разработанный компанией Microsoft и основанный на технологии компонентов ActiveX. ADO позволяет представлять данные из разнообразных источников (реляционных баз данных, текстовых файлов и т. д.) в объектно-ориентированном виде [<http://uk.wikipedia.org/>]

ODBC (Open DataBase Connectivity) — это программный интерфейс (API) доступа к базам данных, разработанный фирмой X/Open. Позволяет единообразно оперировать с разными источниками данных, отвлекаясь от особенностей взаимодействия в каждом конкретном случае [<http://uk.wikipedia.org/>].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Гайдышев И.П.* Анализ и обработка данных. – СПб.: Питер, 2001. – 752 с.
2. *Норенков И.П.* Основы автоматизированного проектирования. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 335 с.
3. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
4. *Богомазов О.А., Иваненко Б.Н., Пфафенрот В.А., Самойленко Н.И.* Интегрированные компьютерные технологии управления системами водоснабжения. – Харьков: Основа, 1998. – 272 с.
5. *Пригожин И.* Наука, цивилизация и демократия // Философия и социология науки и техники. – М., 1989. – С.7–18.
6. *Абрамова Л.В., Полянский С.М., Панасенко А.А.* Автоматизированное управление системами водоснабжения и водоотведения. – Харьков: Основа, 2001. – 192 с.
7. *Евдокимов А.В., Петросов В.А.* Информационно-аналитические системы управления инженерными сетями жизнеобеспечения населения. – Харьков: ХТУРЭ, 1998. – 412 с.
8. *Пряжнинская В.Г., Ярошевская Д.М., Левит-Гуревич Л.К.* Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами. – М.: Физматлит, 2002. – 494 с.
9. *Дмитренко В.П., Евдокимов А.Г., Панасенко А.А., Самойленко Н.И.* Эффективность и надежность управления системами водоснабжения и водоотведения. – Харьков: Бизнес Информ, 2000. – 64 с.
10. СНиП 2.04.02.-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения / Госстрой СССР. – М.:Стройиздат, 1985. – 136 с.
11. *Эгильский И.С.* Автоматизированные системы управления технологическими процессами подачи и распределения воды. – Л.: Стройиздат, 1988. – 216 с.
12. Shorney F. L. Forces transforming the water business // Jour. American Water Works Association Ann. Conf., Washington, D. C., 2000, № 1, p. 88.
13. *Попов А.Е., Хомяков В.В.* Организация оперативного управления в системах водоснабжения городов. – Харьков: Основа, 2000. – 112 с.

14. *Петросов В.А., Агаджанов Г.К., Назарьян Г.В.* Автоматизация работы абонентного отдела предприятий водопроводно-канализационного хозяйства. – Харьков: Основа, 2002. – 174 с.
15. *Черноруцкий И.Г.* Методы принятия решений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
16. *Поспелов Г.С.* Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии. – М.: Наука, 1988. – 280 с.
17. Математическое моделирование в управлении водными ресурсами / *Пряжинская В.Г., Рикун А.Д., Шнайдман В.М.* и др. – М.: Наука, 1988. – 247 с.
18. *Храменков С.В., Примин О.Г.* Принципы и меры обеспечения надежности трубопроводов Московского водопровода // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – №11. – С.5–10.
19. *Петросов В.А.* Прогноз интенсивности отказов водосети – один из путей сокращения потерь и неучтенных расходов воды / /Наук. вісн. будівництва. – 2001. – Вип.12. – С.42-51.
20. *Знаменский В.А.* Экологическая безопасность водной системы Санкт-Петербурга: Анализ состояния. Оценка изменений. Методы восстановления. – СПб.: НИИ химии СПбГУ, 2000. – 119с.
21. *Косыгин А.Б., Ханин В.Н., Фомина И.В.* Анализ технического состояния трубопроводов водопроводной и канализационной сетей г. Москвы // Сб. тезисов докладов седьмого международного конгресса «Вода: экология и технология» (ЭКВАТЭК – 2006). – М.: 2006. – С. 94-96.
22. *Петросов В.А.* Стійкість водопостачання. – Харків: Фактор, 2007. – 360 с.
23. *Осовский С.* Нейронные сети для обработки информации./ Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.
24. *Назаров А. В., Лоскутов А. И.* Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем. – М.: Наука и Техника, 2003. – 384 с.
25. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2000. – 184 с.
26. *Ивахненко А.Г., Мюллер И.А.* Самоорганизация прогнозирующих моделей. – К.: Техніка,1985; Берлин: ФЭБ Ферлаг Техник,1984. – 223 с.
27. Справочник по типовым программам моделирования / Под ред. А. Г. Ивахненко – К.: Техника, 1980. – 182 с.
28. *Самарский А.А., Михайлов А.П.* Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. – М., Наука, 1997. – 320с.
29. *Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П.* Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. – М.: Радио и связь, 1986.–118с.

Литература

30. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. – М., Наука, 1997. – 320с.
31. Флейшман Б.С., Брусиловский П.М., Розенберг Г.С. О методах математического моделирования сложных систем // Системные исследования. Ежегодник. – М.: Наука, 1982. С. 65-79.
32. Лбов Г.С. Методы обработки разнотипных экспериментальных данных. – Новосибирск: Наука, 1981. – 157 с.
33. Ивахненко А.Г., Тимченко И.К., Ивахненко Д.А. Непараметрические прогнозирующие модели МГУА. Часть 4. Автоматика, 1990. – №1. – С.29-39.
34. Назаров А. В., Лоскутов А. И. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем. – М.: Наука и Техника, 2003. – 384 с.
35. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. – М., Наука, 1997. – 320с.
36. Барский А.Б. Нейронные сети: Распознавание, управление, принятие решений. – СПб.:БХВ-Петербург, 2005. – 176 с.
37. Букатова И.Л., Михасов Ю.И., Шаров А.М. Эвоинформатика. Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: Наука, 1991. – 206с.
38. Горбань А.Н. Обучение нейронных сетей. – М.: ParaGraph, 1990. – 160с.
39. Ивахненко А.Г., Зайченко Ю.П., Димитров В.Д. Принятие решений на основе самоорганизации. – М.: «Сов. радио», 1976. – 280 с.
40. Клейнен Дж. Статистические методы в имитационном моделировании. – М.: Статистика, 1978. – 218 с.
41. Крамер Г. Математические методы статистики. М.:НИЦ РХД, 2003. – 648с.
42. Молчанов А.А. Моделирование и проектирование сложных систем. – К.: Вища шк.,1988. – 359 с.
43. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. – М.: Наука, 1984. – 520 с.
44. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессия. – М.: Финансы и статистика,1982. – 302с.
45. Мостеллер Ф., Тьюки Дж. Анализ данных и регрессия. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 30с.
46. Васильев В.И., Ильясов Б.Г., Валеев С.В., Жернаков С.В. Интеллектуальные системы управления с использованием нейронных сетей. Учебное пособие. – Уфа: УГАТУ, 1997. – 92с.
47. Самойленко Н.И., Синельникова О.И., Дашевская Е.Е. Моделирование задач контроля и управления техническим состоянием водораспределитель-

- ной сети методом группового учета аргументов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2007. – Вып. 5/3 (29), – С.13-16.
48. *Танаев В.С., Шкурба В.В.* Введение в теорию расписаний. – М., Наука, 1975. – 256 с.
49. *Шкрыль А.А.* MS Project 2007: современное управление проектами. – СПб: BHV, 2007. – 256 с.
50. ДБН Д.2.2-22-99. Ресурсные элементные сметные нормы на строительные работы. Водопровод – наружные сети. – К.: ЦМИС НПО «Созидатель», 2000. – 69 с.
51. *Петросов В.А., Агаджанов Г.К., Назарьян Г.В.* Автоматизация работы абонентного отдела предприятий водопроводно-канализационного хозяйства. – Харьков: Основа, 2002. – 174с.
52. *Самойленко Н.И., Синельникова О.И., Дашевская Е.Е.* Моделирование задач контроля и управления техническим состоянием водораспределительной сети методом группового учета аргументов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2007. – Вып. 5/3 (29), – С.13-16.
53. *Панасенко А.А., Намяк Д.Е.* Информационно-аналитические системы предприятий ВКХ. – Харьков: Основа, 2005. – 191 с.
54. *Василенко С.Л., Оленюк М.И.* Моделирование качества воды в водостоках. – Харьков: Основа, 2006. – 232 с.
55. *Попов Э.В.* Экспертные системы: решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ. – М.:Наука,1987. – 288 с.
56. *Синельникова О.И., Дашевская Е.Е.* Методология построения экспертной системы управления водораспределительными сетями // Вестник НТУ «ХПИ». Системный анализ, управление и информационные технологии: Сб. научн. трудов. – Х.: НТУ «ХПИ», 2007. – № 41. – С. 154-161.
57. *Скрипкин К. Г.* Экономическая эффективность информационных систем. – М.: ДМКпресс, 2002. – 252с.
58. Советский энциклопедический словарь – М.: Сов. энциклопедия, 1980. – 1600 с.
59. Математическая энциклопедия. – М.: Сов. энциклопедия, 1977-1985. – 5500 с.

Наукове видання

Микола Іванович САМОЙЛЕНКО
Олена Євгенівна ДАШЕВСЬКА

**ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА
З РЕНОВАЦІЇ ВОДОРОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ**

Монографія

За редакцією М.І.Самойленка

Підписано до друку 18.06.2008.
Формат 60х84/16. Папір 80 г/м².
Умов.-друк. арк. – 6,78. Обл.-вид. арк. – 8,25
Наклад 500 прим. Зам. №

ПП. «Видавництво ліхтар»
Свідоцтво ДК № 2864 від 30.05.2007 р.
84607, м. Горлівка, вул. Золотникова, буд. 11, кв 148.

Надруковано у друкарні ТОВ «Современная печать»
на цифровому лазерному видавничому комплексі Rank Xerox DocuTech 135,
на цифровому лазерному комплексі Rank Xerox Docucolor 7000.
61024, Харків, вул.. Лермонтовська, 27.
Телефон (057) 752-47-90